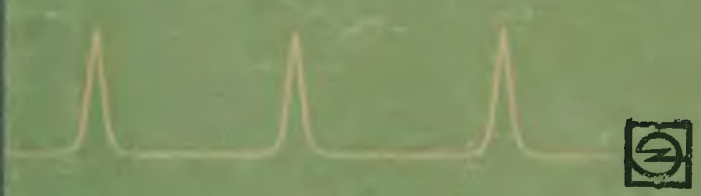
Ф. ФРЮНГЕЛЬ

Импульсная техника



Ф. ФРЮНГЕЛЬ

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

ГЕНЕРИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРЯДОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Перевод с немецкого
Д. М. Калеко и *Ю. К. Коржова*
под редакцией
академика АН УССР К. К. ХРЕНОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.374
Ф 82

В книге содержатся сведения по конструкции и эксплуатации установок, в которых получают и используют конденсаторный разряд.

Описаны различные методы измерений.

Книга предназначена для инженеров-физиков и инженеров-электриков, занятых созданием приборов и аппаратуры в различных областях техники, где используется разряд конденсаторов для получения импульсов других форм энергии.

Frank Früngel

Impulstechnik. Erzeugung und Anwendung von Kondensatorentladungen, 2, durchgesehene Auflage

Leipzig, 1960, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.—G.

Франк Фрюнгель

Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов, перевод с немецкого, М.—Л., издательство «Энергия», 1965, 488 с. с черт.

Тематический план 1965 г., № 143

* * *

Редактор *М. И. Николаева* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в набор 30/III 1965		Подписано к печати 28/VI 1965 г.
Бумага 84×108¹/₃₂	Печ. л. 25,62	Уч.-изд. л. 26,97
Тираж 13 500 экз.	Цена 2 р. 04 к.	Заказ 222

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Все чаще разряд конденсаторов используется в различных областях техники для получения импульсов других форм энергии. Физики или инженеры-электрики, занятые созданием приборов и аппаратуры, должны быть знакомы с этой специальной областью.

В предлагаемой книге содержатся соображения по конструкции и функционированию установок, существенные для техники конденсаторного разряда. В ней предпринята попытка, основанная на 20-летней практике работы в области техники конденсаторного разряда, объединить в монографии разбросанный в литературе материал. Особенно обстоятельно описаны различные методы измерений. Книга содержит также некоторые неопубликованные работы автора, которые были тщательно обработаны.

В отношении системы измерений иногда допускались отклонения от норм и использовалась старая система CGS или применялось известное машиностроителям определение силы (например, тонна вместо мегапонда), чтобы облегчить практикам чтение книги.

Особую благодарность я хотел бы выразить инженерам Тхорварту и Вегманну за предоставление фотоснимков, а также специальных схем.

Благодарю издателя и издательство за радостный совместный труд.

Франк Фрюнгель

Гамбург — Риссен, июль 1959 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Книгу «Импульсная техника» написал Ф. Фрюнгель, крупный специалист, ученый и инженер, совладелец фирмы, работающий в ФРГ. Книга посвящена техническому использованию разряда конденсаторов с преобразованием накопленной энергии в другие формы. Книга отличается широтой охвата темы, простотой и вместе с тем конкретностью и точностью изложения, богатством практических сведений. Она не требует от читателя особой подготовки и не перегружена математическими выводами.

Весьма разнообразное содержание книги размещено в 12 главах. Изложение начинается рассмотрением конденсаторов, среди них — новые специальные типы, представляющие несомненный интерес для нашей промышленности. Далее следуют включающие устройства, замыкающие разрядную цепь, за ними — соединительные провода, конструкция которых в импульсных установках часто имеет существенное значение. Рассмотрено получение от конденсаторов больших импульсов тока, в том числе для термоядерных установок.

Много внимания уделено получению импульсов напряжения, в том числе периодических и очень кратковременных. Интересна система электрического ограждения земельных участков, хотя она вряд ли допустима в наших условиях при действующих правилах техники безопасности.

Интересен небольшой раздел, рассматривающий молнии как разряды конденсаторов. Интересно рассмотрено преобразование энергии конденсаторов в рентгеновские вспышки, что открывает большие возможности для рентгенографии движущихся объектов. Много внимания уделено превращению конденсаторов энергии в теплоту. Здесь рассмотрены интересные новые способы импульсной конденсаторной сварки металлов и новые типы машин для нее.

Небольшая интересная глава посвящена преобразованию накопленной энергии в импульсные очень сильные магнитные поля, например для исследований в ядерной физике.

Интересен раздел по превращению накопленной энергии в звуковые импульсы. Привлекают внимание процессы с импульсами от искровых разрядов в жидкости, часто называемые у нас электрогидравлическим эффектом, даны краткая, но четкая теория этого процесса и сравнение его с действием взрывчатых веществ. Интересно изложены и получение световых вспышек за счет энергии конденсаторов и использование вспышек в разных областях техники.

Отдельно рассмотрены передача сигналов импульсами света и использование ее для разных целей, например для определения высоты облаков и измерения видимости.

Самая большая по объему заключительная глава посвящена импульсной измерительной технике. Здесь изложены измерения искровыми разрядами, измерение импульсных токов, напряжений, световых импульсов, быстропротекающих тепловых процессов. При переводе произведены небольшие сокращения некоторых мест пересказа достаточно известных литературных данных, например по теории действия тиратронов, эффекта Холла, процесса электроискровой обработки.

Книга Фрюнгеля написана очень просто и доступно, вместе с тем она богата конкретными расчетными и конструктивными данными, практическими указаниями. Конечно, охватывая весьма широкий круг вопросов, автор не мог избежать местами известной конспективности изложения, и читателю, желающему изучить во всех деталях тот или иной вопрос, придется обратиться к более специализированной литературе.

К. К. Хренов

19 декабря 1964 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к первому изданию 3
Предисловие к русскому изданию 4
A. Конденсатор в разрядном контуре 11
1. Конденсатор в разрядном контуре и схема замещения . . 11
2. Конденсаторы для кратковременных высоких пиков мощности 15
3. Конденсатор большой энергии для очень мощных отдельных разрядов 18
4. Импульсный конденсатор при периодической загрузке . . 22
5. Периодический разряд конденсаторов 27
6. Конденсаторная батарея для большой длительной мощности при разряде 33
7. Конденсаторы с чрезвычайно высокой изоляцией 34
B. Включающие устройства 37
1. Тиратроны 37
2. Мультивибратор 37
3. Симметричные ионные прерыватели 40
4. Поджигаемый искровой разрядник 47
5. Ударный выключатель 59
6a. Безынерционный искровой разрядник для высокой частоты разрядов 61
6b. Вентильный разрядник 66
7. Действие включающих реле при заданном фазовом угле 68
8. Искровой разрядник с воздушным дутьем 75
9. Пневматические включающие элементы 77
10. Искрогасящий разрядник 80
C. Провода 85
1. Влияние волнового сопротивления 85
2. Воздушные провода с большим радиусом для высокого и наивысшего напряжений 87
3. Коаксиальный провод 88
4. Энергетические соображения 91
5. Ленточный провод 92
6. Формы компенсационной проводки 95
D. Превращение энергии конденсаторов в импульсы тока 98
1. Прямой разряд через проводник 98
2. Трансформированный разряд для получения максимальных пиков тока 103

E. Превращение энергии конденсатора в импульсы напряжения 115
1. Каскадная схема 115
2. Импульсный трансформатор 122
3. Устройство импульсного напряжения для периодической работы и очень коротких импульсов 132
4. Манипуляторы с искровыми разрядниками по Марксу . . . 146
5. Поджигающие трансформаторы для двигателей внутреннего сгорания 155
6. Импульсы напряжения в обширных проводящих системах 157
7. Автоматическая защита электрических воздушных линий посредством периодического разряда конденсаторов . . . 161
8. Молнии как разряды конденсаторов 164
9. Крутизна импульсов напряжения 167

F. Преобразование энергии конденсаторов в рентгеновские вспышки 172
1. Генерирование кратковременных рентгеновских излучений 172
2. Рентгеновское просвечивание движущихся объектов . . . 178
3. Рентгеновская импульсная трубка с двойным анодом для стереоскопических снимков [Л. 26] 179
4. Конструкции рентгеновской импульсной трубки для широких пределов импульсов напряжения 180
5. Эксплуатационные данные импульсных рентгеновских трубок 181
6. Импульсные рентгеновские аппараты для жесткого излучения 199
a) Способ действия рентгеновской импульсной трубки . . 199
b) Рентгеновский импульсный аппарат на 200 *кв* 201
c) Применение рентгеновских импульсных аппаратов . . 202
d) Рентгеновские диоды напряжением 1,5 *Мв* [Л.113—119] 203

G. Превращение энергии конденсаторов в теплоту . . . 206
1. Импульсная сварка, непосредственный разряд конденсатора 206
2. Трансформированный разряд конденсатора в сварочной технике 208
3. Электродинамическое „охлаждение" выбросом частичек, конденсаторная импульсная сварка 227
4. Микроиндукционная закалка. Применение кратковременного нагрева импульсом накопленной емкостной энергии 233
5. Высокочастотный нагрев быстро чередующимися импульсами. Высокочастотный искровой генератор Маркса . . . 243

H. Превращение энергии конденсаторов в магнитные поля 245
1. Создание кратковременных очень сильных магнитных полей 245
2. Применение сильных магнитных импульсных полей в ядерной физике 246
3. Намагничивающие приборы с конденсаторным разрядом 250

I. Превращение энергии конденсаторов в звуковые импульсы 258
1. Превращение с помощью электроакустического преобразователя 258

2. Звуковые импульсы в воздухе для обеспечения безопасности передвижения 260
3. Получение звуковых импульсов путем разрядов конденсаторов 261
4. Аналогия превращений при взрыве взрывчатых веществ с получением звуковых импульсов 266
5. Звуковые импульсы от искр в жидкостях и их фокусирование 272
6. Источники звуковых импульсов с жидким электродом . . 275
7. Конструкция и метод работы мощных импульсных генераторов с белым ультразвуковым спектром 279
8. Биологическое применение звуковых волн 280
9. Подводный искровой разряд как источник вспышек света большой силы 283
10. Импульсные волны при оптическом измерении напряжений 284

K. Получение вспышек света с помощью накопленной в конденсаторах энергии 287
1. Скользящий искровой разряд 287
2. Капиллярный искровой разряд 300
3. Свободный искровой разряд в атмосфере высокого давления 306
4. Техника искрогасительных камер 311
5. Управляемый высокочастотный разряд конденсатора для получения вспышек 327

L. Передача сигналов посредством излучения света разрядами конденсаторов 352
1. Постановка задачи при системах передачи импульсами света 352
2. Протекание во времени и спектральный состав светового сигнализирующего импульса 356
3. Расчет передающей установки 361
4. Экспериментальные основы и результаты 365
5. Применение импульсной оптики с искровыми разрядами 379
a) Автомобильный аппарат обгонной сигнализации . . . 379
b) Импульсно-оптический измеритель высоты облаков 389
c) Трансмиссометр. Импульсно-оптический измеритель видимости 397

M. Импульсная измерительная техника 404
1. Источники высокого напряжения 404
a) Постановка задачи 404
b) Испытательный аппарат высокого напряжения для импульсных исследований 405
c) Измерение емкости счетчиком кулонов 410
2. Импульсные измерения искровыми разрядниками 412
a) Постановка задачи 412
b) Виды разрядов 413
c) Искровой разрядник острие—пластина 434
d) Измерения высокочастотных и импульсных напряжений 435
e) Влияние плотности и влажности воздуха 436
f) Искровой игольчатый разрядник для измерения времени 436

g) Влияние формы и длительности бегущей волны . . . 437
h) Импульсное отношение 438
i) Влияние полярности волны 442
k) Практические измерения бегущих волн 443
l) Искровой закон Теплера 444
m) Искровая постоянная 444
n) Определение длительности искры 446
o) Последовательные сопротивления и емкости у искровых разрядников 448
p) Временные границы применения искровых разрядников 450
3. Измерение импульсных токов. Сильноточный шунт . . . 452
4. Измерение напряжений с помощью делителей напряжения 454
a) Делитель напряжения 454
b) Емкостный делитель напряжения 454
c) Омический делитель напряжения 456
d) Смешанный емкостно-омический делитель напряжения 459
5. Измерения импульсов с последующими колебаниями . . . 464
6. Измерительная техника световых импульсов 466
a) Простая функциональная проверка приемника световых импульсов 466
b) Измерение амплитуды световых импульсов 467
c) Абсолютное измерение калибровочным генератором 471
d) Приемник световых импульсов при измерении сцинтилляций 472
7. Оптические измерения быстропротекающих тепловых процессов 473
a) Анализатор частоты сильно заторможенных колебаний 475
b) Измерение угла потерь емкостей посредством демпфирования колебаний 480
c) Пример измерения угла потерь емкости посредством демпфирования колебаний 482
Литература 485

А. КОНДЕНСАТОР В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ

1. КОНДЕНСАТОР В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Мысль аккумулировать слабые электрические токи и затем разрядить их в мощном импульсе тока вытекает непосредственно из экспериментального открытия электричества. Заряд шара электризацией трением, эксперименты с кондукторами, например с электрофором, наконец, накопление электричества в лейденской банке являются шагами развития электрического конденсатора. Конструктивные формы, подобные лейденским банкам, представляют современные керамические горшочные конденсаторы.

Емкость конденсатора C измеряется в фарадах ($Ф$ или F), причем 1 $ф$ есть емкость, для заряда которой на 1 $в$ требуется зарядный ток в 1 $а$, протекающий 1 $сек$, или при разряде она отдает 1 $а \cdot сек$, или 1 $к$ электричества. Таким образом, $CU = It$. Более употребительны меньшие единицы емкости: $10^{-6}\ ф = 1$ микрофарада ($мкф$ или μF); соответствующая ей емкость заряжается при напряжении зарядки 1 $кв$ зарядом в 1 миллиампер-секунду; в высокочастотной технике употребительны единицы $10^{-9}\ ф = 1$ нанофарада ($нф$ или nF) и $10^{-12}\ ф = 1$ пикофарада (1 $пф$ или pF). В отличие от этого электротехнического определения физическая единица емкости в системе CGS представляет шар радиусом 1 $см$, имеющий емкость 1 $см$. Единицы 1 $пф$ и 1 $см$ переводят одну в другую, сохраняя отношение 1 $пф = 0{,}9$ $см$, 1 $см = 10/9$ $пф$.

Каждый процесс зарядки конденсатора начинается при напряжении на конденсаторе 0 и оканчивается при конечном напряжении U. Отсюда среднее арифметическое зарядного и разрядного напряжений $\frac{U}{2}$. Так как

накопленное или отданное количество электричества составляет $It\ (a \cdot сек) = CU$, накопленная энергия A в заряженном конденсаторе

$$A = \frac{1}{2} CU^2.$$

Если зарядка происходит через любой проводник, обладающий сопротивлением, от источника постоянного напряжения U, то из-за отсутствия напряжения на конденсаторе в начале зарядки энергетический к. п. д. зарядки в идеальном случае равен 0,5 или 50%. Для всех конденсаторов время зарядки и время разряда могут быть выбраны как произвольные параметры.

Принципиально каждый конденсатор имеет две обкладки. В особом случае свободно висящего шара, определяющего единицу емкости в системе CGS, второй обкладкой служит бесконечность окружающего пространства; в технических конденсаторах обе обкладки расположены друг против друга на малом расстоянии. Средой между обкладками служит диэлектрик, в качестве которого может быть вакуум, газ, жидкость или твердое тело. Диэлектрическая постоянная есть множитель, на который при внесении диэлектрика между обкладками умножается емкость конденсатора по сравнению с вакуумом между обкладками. Каждый диэлектрик в зависимости от своей структуры, в особенности от подвижности молекулярных диполей, при каждой перезарядке конденсатора уменьшает зарядную энергию на определенную величину потерь, которые выделяются в материале как теплота трения. На векторной диаграмме это явление отмечается как угол потерь, тангенс которого обозначается $\operatorname{tg} \delta$. Потеря мощности при зарядке переменным током с действующим напряжением U при частоте $2\pi f = \omega$ составляет $N = U^2 C\, \omega \operatorname{tg} \delta$. Угол потерь является решающим при оценке качества конденсатора при использовании его в колебательном режиме, но не в импульсном разряде. При апериодическом разряде на потребитель с малым сопротивлением конденсаторные обкладки с их собственным сопротивлением совместно с потребителем представляют делитель напряжения на сопротивлениях. Если, например, конденсатор с собственным сопротивлением 1 *Мом* разряжается на потребитель с сопротивлением 9 *Мом*, то уже омические потери составят 10%. Даже при большом угле потерь в диэлек-

трике ($\operatorname{tg}\delta = 10^{-2}$) при разряде, который в апериодическом случае соответствует только одной полуволне, диэлектрическая потеря равна всего $1/2 \cdot 10^{-2}$, т. е. пренебрежимо мала. Кроме хорошо известного значения малого собственного сопротивления, при оценке импульсных конденсаторов нужно обращать внимание и на возможно малую индуктивность, так как на собственную индуктивность L в начале импульсного процесса ответ-

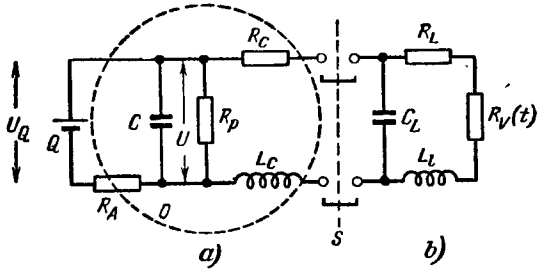


Рис. 1. Принципиальная схема емкостного накопителя энергии и потребителя импульсного разряда.

a — электрические величины внутри конденсатора до его присоединительных клемм; *b* — электрические величины во внешнем разрядном контуре.

вляется энергия $^1/_2 LI^2$, которая хотя и не теряется, так как она при дальнейшем течении разряда отдает дополнительный накопленный ток, но уменьшает амплитуду импульсного тока.

Также нужно иметь в виду механическую устойчивость обкладок импульсного конденсатора. При каждом заряде и разряде обкладки сдвигаются вследствие электростатического притяжения соответственно сжимаемости диэлектрика. Дополнительно используются все другие степени свободы механической игры обкладок; наступают сначала упругие, затем остаточные пластические изменения в материале конденсатора и, наконец, разрушение от усталости, которое возникает как спонтанный пробой в механически разрушенном месте диэлектрика. В технических конденсаторах механическое движение обкладок проявляется как звуковой импульс при каждом разряде.

На рис. 1 показана схема замещения конденсатора в случае разряда. Буквы на ней обозначают:

C — накопительный конденсатор;

U — напряжение зарядки;

R_p — сопротивление утечки;

R_C — общее сопротивление между клеммами;

L_C — общая индуктивность между клеммами;

O — эффективная охлаждаемая поверхность конденсатора;

$\operatorname{tg}\delta = R\omega C$ — угол потерь;

ω — частота контура всех L и C в контуре;

R_A — зарядное сопротивление;

Q — источник постоянного тока с напряжением U_Q;

f — частота разрядов, т. е. частота действия включающего устройства S;

C_L — вредная общая емкость внутренних проводников потребителя;

L_L — вредная индуктивность внутренних проводников потребителя;

$Z = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}}$ — волновое сопротивление внутренних проводников контура потребителя;

R_L — сопротивление внутренних проводников;

$R_V(t)$ — полезное активное сопротивление потребителя, часто зависящее от времени;

I — средний действующий ток во время процесса разрядки.

Общее определение коэффициента полезного действия:

$$\eta = \frac{\int_0^t \bar{I}^2 R_V(t)\,dt}{\sum_0^t \frac{1}{2} CU^2}, \quad вт \cdot сек / вт \cdot сек.$$

Предельные случаи

1. $R_V \to \infty$, например в ионизационной камере, обусловленное только носителем разряда в измерительном пространстве.

Требуется: постоянная времени разряда $t_S = R_p C \to \infty$; таким образом, $R_p \to \infty$.

Достижимо: трехслойный конденсатор; $t_S = 2\,000$ лет [Л. 1].

Не влияют: все другие величины.

2. $R_V \to 0$, например при сильноточном искровом разряде. Почти не влияют R_p, C_L, когда $C_L \ll C$. Значительное влияние оказывают

R_C, L_C, R_L, L_L. Эти величины следует конструктивными мероприятиями насколько возможно приближать к нулю.

3. Потребитель с заданным R_V между 1 и 100 *ом*. Здесь в случае неизбежных проводов волновое сопротивление должно быть $Z = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \approx (R_L + R_V)$, чтобы гарантировать отсутствие отражения энергии.

4. Потребитель с обеспеченным протеканием разряда в предельном апериодическом случае:

$$(R_V + R_L + R_C) = \sqrt{\frac{4(L_C + L_C)}{C + C_L}}.$$

Для высокого η требуется: $R_L + R_C \ll R_V$.

Для наивысшей пиковой мощности необходимо требовать: $L_C \ll L_L$; достижимо 10^{-8} *гн* $= 10^4$ *см*.

2. КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКИХ ПИКОВ МОЩНОСТИ

Для кратковременных разрядов, в особенности для единичного разряда, нагрев конденсатора практически не играет никакой роли. Время разряда t и энергия $\frac{1}{2} CU^2$ при прямоугольном импульсе дают мощность

$$N = \frac{\frac{1}{2} CU^2}{t}, \text{ вт}.$$

Не принимая в расчет влияния объекта воздействия импульса, которое при известных обстоятельствах увеличивает время разряда, t зависит только от C и общей индуктивности разрядного контура, равной по рис. 1,*а* и *b*

$$L = L_C + L_L.$$

Тогда полупериод $t = \pi\sqrt{LC}$ и $N = \frac{\frac{1}{2} CU^2}{\pi\sqrt{LC}}$. Соответственно этому получаемая при данном C импульсная мощность пропорциональна $\frac{1}{\sqrt{L}}$. Для того чтобы значительно приблизить индуктивность L к нулю, часто конденсаторы выполняют в соответствии с рис. 2. Вокруг трубки *1* плотно намотаны металлическая фольга и ди-

электрик *2*. Цифры *3* и *4* обозначают полюсы намотанной фольги.

К полюсам, изолированным от обкладок центральным болтом *5*, прижимаются контактные шайбы *6* или прочно припаиваются или соединяются методом металлизации

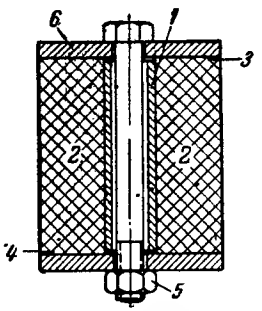


Рис. 2. Конструкция цилиндрического намотанного конденсатора с малой индуктивностью.

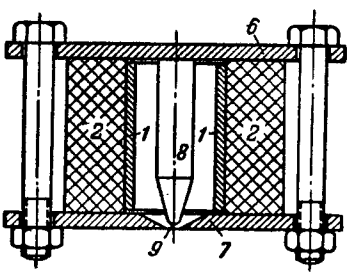


Рис. 3. Конструкция конденсатора с коаксиальным расположением обратного электрода для генерирования точечных искр. Наивысшая мгновенная мощность.

шайбы с фольгой или запрессованными в нее наконечниками.

Рис. 3 показывает систему, состоящую из подобного конденсатора. В ней может быть получена индуктивность 0,01 *мкгн*, и, как показывает примерный расчет при $C = 0{,}1$ *мкф* и $U = 10$ *кв*,

$$N_{\text{имп}} = \frac{\frac{1}{2} CU^2}{\pi \sqrt{LC}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 10^{-7} \cdot 10^{8}}{\pi \sqrt{10^{-8} \cdot 10^{-7}}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 10^{8}}{\pi \sqrt{10^{-1}}} \approx 50 \text{ } Мвт$$

при запасенной энергии только 5 *вт·сек*!

Длительность разряда будет при этом

$$t = \pi \sqrt{LC} \approx 10^{-7} \text{ } сек.$$

Это значение гипотетично, поскольку не учитывается сопротивление потребителя, которое за время одной полуволны поглощает выделяемую энергию.

На рис. 4 показана форма исполнения промышленного конденсатора с малой индуктивностью и большой

импульсной мощностью. На рисунке показана батарея таких конденсаторов, питающая искровой разрядник. Три цилиндрических намотанных полистироловых конденсатора расположены вокруг оси. Каждый конденсатор состоит из запрессованных непосредственно одна в другую отдельных обмоток, и индуктивность, возникающая вследствие цилиндрической формы каждого конденсатора, компенсируется бифилярным корпусом из пары медных цилиндров. Можно прикрепить на общем сборном листе большое число конденсаторов этого типа.

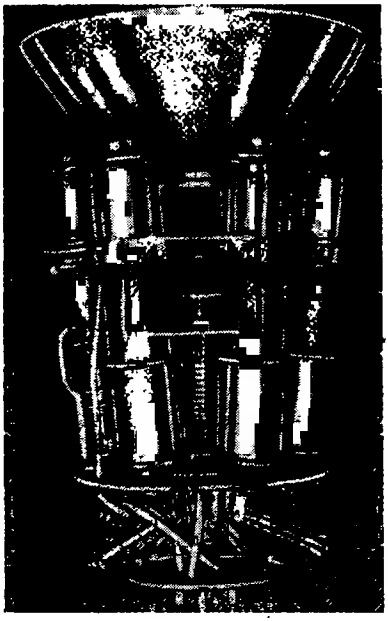


Рис. 4. Полистироловые конденсаторы на искровом разряднике с малой индуктивностью 0,03 *мкгн*, пик мощности 30—40 *Мвт*.

Конденсаторы работают при напряжении зарядки 10 *кв* и дают импульсный ток амплитудой 6 *ка*, возникающий при непосредственном разряде через искровую камеру с искровым сопротивлением около 0,6—1 *ом*. Максимальная импульсная мощность, таким образом, равна 60 *Мва*; максимальная эффективная импульсная мощность определяется перемножением кривых тока и напряжения. Она оказывается равной 30—40 *Мвт*. Для большого импульсного тока при высоком напряжении изготавливают бумажный или полистироловый конденсатор с минимальной индуктивностью из алюминиевой фольги. Он часто пропитывается в вакууме парафином. Широкая контактная поверхность алюминия, образующаяся благодаря запрессовке выводов, связана с соответствующим полюсом следующего конденсатора прижатыми к ним точно установленным давлением контактными шайбами, и оказывается, что импульсный ток до

2 000 *а* беспрепятственно проходит при очень высокой частоте следования импульсов, например 50 000 *имп/сек.*

Здесь также решающим для уменьшения общей потери является скорее незначительное сопротивление соединения емкостных элементов, чем малый угол потерь материала диэлектрика. Благодаря пропитке повышается механическая стойкость конденсатора против электростатической работы, поэтому у пропитанных конденсаторов наблюдаются меньшие потери при периодическом разряде, чем у конденсаторов без вакуумной заливки.

3. КОНДЕНСАТОР БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОЧЕНЬ МОЩНЫХ ОТДЕЛЬНЫХ РАЗРЯДОВ

Для получения так называемого «пинчевого» искрового разряда с самосжатием плазмы наивысших температур энергия питающей конденсаторной батареи должна быть примерно от 5 до 5000 *кдж.* Индуктивность должна быть крайне малой, чтобы гарантировать очень быстрое развитие высокого импульса мощности. Для этого в качестве конструктивных элементов используются конденсаторы, показанные на рис. 6a, 6b и 6c, так как внутреннее сопротивление для всей батареи в этом случае не должно превышать нескольких микроом. Так как часто производят параллельное включение многих сотен подобных импульсных конденсаторов, то в результате на каждый из них приходится величина ниже 1 *мом.* Подобное можно сказать и в отношении индуктивности: параллельное соединение, например, 500 элементов с индуктивностью 0,2 *мкгн* имеет собственную индуктивность $\frac{1}{250}$ *мкгн.* Это показывает, что проблема снижения индуктивности при параллельном соединении малоиндукционных конденсаторов заключается только в подводящих проводах. Требуется бифилярная конструкция сборных шин; в то же время для конденсатора главная проблема лежит в получении крайне незначительного внутреннего сопротивления и высокой динамической прочности.

Так как одинаково направленные токи, как известно, притягиваются, необходимо при конструировании конденсатора правильным расположением соединений обмоток позаботиться о том, чтобы не произошло сужения

пути тока внутри конденсатора, из-за чего возрастает индуктивность при увеличении тока. Усилия в конденсаторной батарее при разряде, близком к короткому замыканию, могут быть определены из следующих соображений.

Импульсный конденсатор современной конструкции имеет энергию от 50 до 100 *дж* на 1 *л* объема. При отсутствии сопротивления в случае идеального разряда энергия заряженного конденсатора не может переходить в тепло и целиком освобождается в виде механической энергии через динамические, т. е. магнитные сжимающие силы в конденсаторе и между соседними конденсаторами и в меньшей степени спонтанное снятие сжатия в диэлектрике. 100 *дж* соответствуют 10 *кг · м*, так что воспринимается энергия 10 *кг · м/л*. Если превращение энергии происходит только в течение 1 *мксек*, импульсная мощность на 1 *л* объема конденсатора получается равной 10^7 *кг · м/сек*, или, грубо, 10^5 *л. с.* за 1 *мксек*. Это напряжения, которые соответствуют удару небольшого артиллерийского снаряда по конденсатору, и лучшим решением проблемы будет изготовлять конденсатор жестко и конструктивно прочно, например обкладки, изготовленные способом металлизации, наматывать так плотно, чтобы конденсатор выдерживал без особого ухудшения удар снаряда по обкладкам (без защиты наружной броней листового кожуха). Конденсаторы, представленные на рис. 6а—6с, соответствуют этим требованиям.

Рис. 5 представляет эскиз конструкции конденсаторной батареи емкостью 10 *мкф* и напряжением заряда 102 *кв* при мощности 52 *квт · сек* с собственной индуктивностью, обусловленной геометрией, 0,15 *мкгн*. По данным изготовителя (Hydrawerk, Берлин), амплитуда начального импульса тока в разрядном контуре с малыми индуктивностью и омическим сопротивлением

$$I = U\sqrt{\frac{C}{L}} \approx 830\,000\ a.$$

Собственная индуктивность для трубчатой системы определяется исключительно индуктивностью лобовых листов, ведущих к полушаровому разряднику.

Потребителями энергии подобных импульсных батарей чаще всего служат специальные искровые камеры,

которые часто еще нагружают созданием вспомогательных магнитных полей. Но и чистое создание магнитного поля для наблюдения ядерных процессов ставит те же задачи (например, создание магнитного поля напряженностью 500 000 *э* за 1 *мксек* требует 30—50 *кдж*, как будет показано ниже).

При экспериментальном наблюдении синтеза ядер в сильноточном искровом разряде, о котором в Лондоне докладывал И. В. Курчатов [Л. 2], впервые можно было экспериментально установить эмиссию нейтронов из искровых разрядов. Число таких исследований растет лавинообразно во многих местах на установках с большими конденсаторными батареями.

Сборка специальных конденсаторных батарей для мощных одиночных импульсов из имеющихся в продаже отдельных эле-

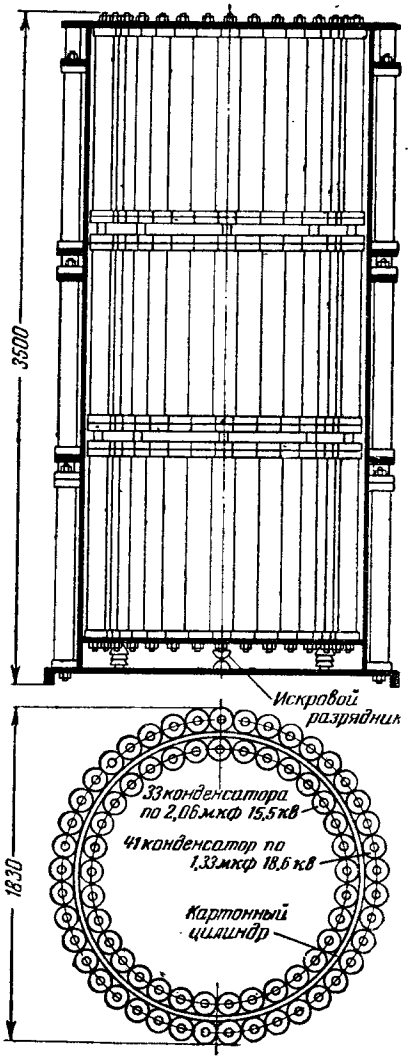


Рис. 5. Вид сбоку и поперечное сечение импульсного конденсатора на 52 *кдж*; емкость 10 *мкф*; номинальное напряжение 102 *кв* (конструкция фирмы Hydrawerk, Берлин).

Номинальная емкость 10 *мкф*; зарядное напряжение 102 *кв*; энергия заряда 52 *квт · сек*; собственная индуктивность около 0,15 *мкгн*; амплитуда импульсного тока в разрядном контуре с малыми индуктивностью и затуханием $U\sqrt{\frac{C}{L}} \sim 830\,000$ *а*.

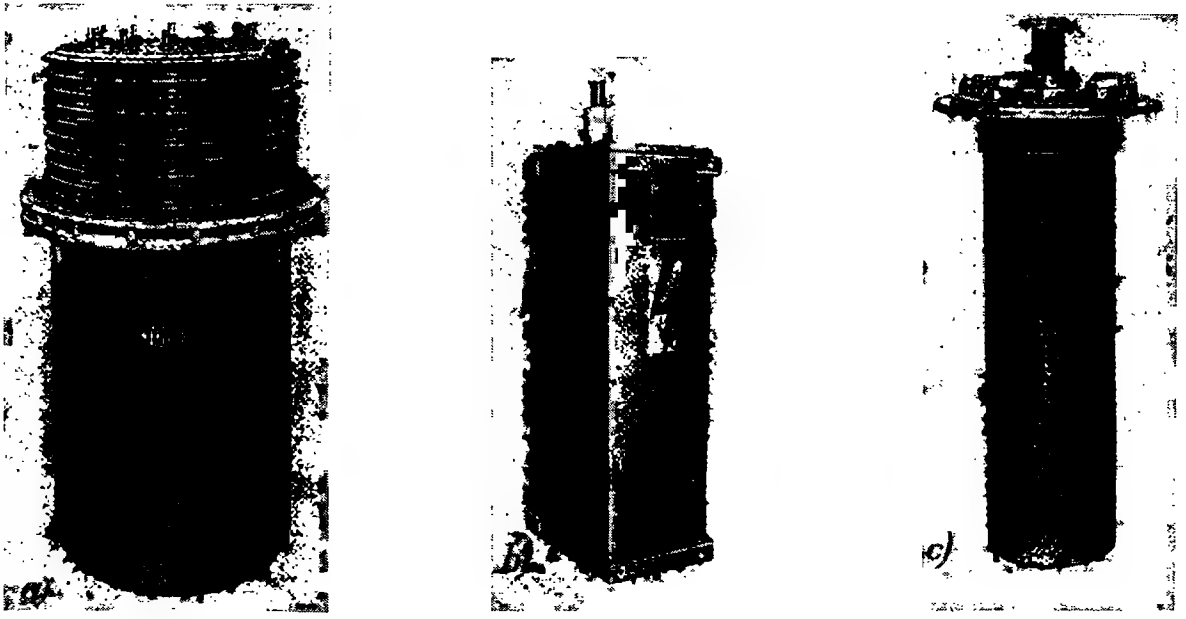


Рис. 6a. Импульсный конденсатор фирмы Philip Deutschmann (Tobe, США). Емкость 0,8 *мкф*; напряжение 100 *кв*; индуктивность 0,12 *мкгн*; пик мощности $20 \cdot 10^9$ *вт*.

Рис. 6b. Импульсный конденсатор фирмы Hydrawerk, Берлин. Призматическая конструкция: 40 *кв*; 4 *квт · сек*; 0,27 *мкгн*; присоединительные выводы для укрепления шин.

Рис. 6c. Импульсный конденсатор фирмы SAF, Нюрнберг. Цилиндрическая конструкция с напыленными обкладками (металло-бумажными): 2 *мкф*; 25 *кв*; 0,03 *мкгн*.

ментов является экономичным путем создания подобной аппаратуры, обычно имеющей запас энергии не ниже 50 *кдж*. Две специальные формы выполнения немецких конденсаторов, выпускаемых как отдельные элементы больших батарей, представлены на рис. 6b и 6c.

4. ИМПУЛЬСНЫЙ КОНДЕНСАТОР ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКЕ

Для длительных серий разрядных импульсов большой энергии и их быстрого следования друг за другом дополнительно получают значение тепловые процессы.

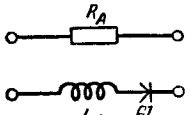


Рис. 7. Зарядное сопротивление и зарядный дроссель.

Нормально в зарядном сопротивлении R_A конденсатора образуется тепловая энергия, равная накопленной в конденсаторе электрической энергии $\frac{1}{2}CU^2$ (рис. 7). Уменьшить эту тепловую потерю можно заменой R_A индуктивностью с выпрямителем, причем величина индуктивности зависит от высшей из ожидаемых частот f.

При зарядке через сопротивление при этой частоте требуется, чтобы напряжение зарядки было не намного ниже напряжения питающего источника, например на 13,5%, соответствующих $\frac{1}{e^2}$ ($e=2{,}718\ldots$):

$$U \geqslant 0{,}87U_Q.$$

Тогда постоянная времени зарядки $t_A = R_A C$ будет равна примерно половине наименьшего промежутка между разрядами; в таком случае после одной постоянной времени $U = \left(1 - \frac{1}{e}\right)U_Q$; после двух постоянных времени

$$U = \left(1 - \frac{1}{e^2}\right)U_Q \approx 0{,}87U_Q; \quad t_A = \frac{1}{2f}; \quad R_A = \frac{1}{2fC}.$$

Если R_A заменяют зарядным дросселем L_A и выпрямителем Gl, то омические потери в зарядном сопротивлении заменяются индуктивным накоплением энергии $\frac{1}{2}LI^2$, действие которого заключается в том, что конден-

сатор C заряжается до более высокого напряжения. При этом

$$\underset{\text{заряд конденсатора через сопротивление}}{\frac{1}{2}CU^2} + \underset{\text{накопление энергии в зарядном дросселе}}{\frac{1}{2}LI^2} = \underset{\text{разряд}}{CU_e^2}.$$

Напряжение U_e при включении дросселя, не имеющего сопротивления, таким образом, может быть в $\sqrt{2}$ раз выше, чем без него, но при включении выпрямителя, собственное сопротивление которого в проводящем направлении создает, естественно, потери и уменьшает U_e. Величина зарядного дросселя для половины наиболее высокой частоты разряда в соответствии с рис. 8 может быть представлена как

$$L = \frac{1}{\left(2\pi\frac{f}{2}\right)^2 C} \approx \frac{1}{10f^2C}.$$

Выпрямитель выбирается для кратковременных импульсов тока следующим образом:

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}CU^2; \quad I_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{CU^2}{L}}.$$

Среднее значение тока выпрямителя определяется через заряд конденсатора $Q = CU$ и частоту разрядов f как $I = fCU$. Обратное напряжение выпрямителя должно быть равно U_e!

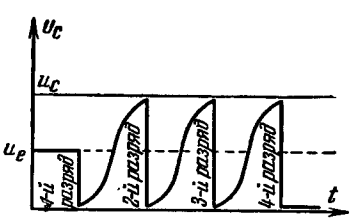


Рис. 8. Изменение напряжения U_C на конденсаторе при зарядке через дроссель.

Допустимое общее сопротивление комбинации дроссель — выпрямитель выбирается, исходя из того, окупается ли увеличение затрат отсутствием омического сопротивления R_A и вследствие этого уменьшением тепловых потерь примерно на $^1/_3$. Пока выпрямитель, имеющий малое сопротивление, совместно с индуктивностью дешевле, чем получаемая экономия, следует отдавать предпочтение выпрямителю.

Пример

Емкость $C=0{,}5$ *мкф* $=5\cdot 10^{-7}$ *ф* в качестве разрядного конденсатора должна заряжаться и разряжаться с частотой $f=10\,000$ *1/сек* при напряжении $U=10$ *кв*. (Здесь под вопросом возможность зарядки.) При этом при энергии заряда

$$A_L=\frac{1}{2}CU^2=\frac{1}{2}5\cdot 10^{-7}\cdot 10^8=25\ \textit{вт}\cdot\textit{сек};$$

величина заряда

$$Q=CU=5\cdot 10^{-7}\cdot 10^4=5\cdot 10^{-3}\ \textit{а}\cdot\textit{сек}.$$

Средний ток тогда равен

$$I=fQ=10^4\cdot 5\cdot 10^{-3}=50\ \textit{а}.$$

При зарядке через омическое сопротивление величина этого сопротивления должна быть

$$R_A=\frac{1}{2fC}=\frac{1}{2\cdot 10^4\cdot 5\cdot 10^{-7}}=100\ \textit{ом}.$$

Напряжение зарядного источника по приведенному выше соотношению $U_C=\left(1-\frac{1}{e^2}\right)U_Q$ должно быть

$$U_Q=\frac{10^4}{1-\frac{1}{e^2}}\approx 12\ \textit{кв}.$$

Мощность, возвращаемая конденсатором во время периодических разрядов,

$$N=f\,\frac{1}{2}CU^2=fA_L=10^4\cdot 25\,\frac{\textit{вт}\cdot\textit{сек}}{\textit{сек}}=250\ \textit{квт};$$

потребляемая от источника тока

$$U_Q I=12\cdot 50=600\ \textit{квт}.$$

Отсюда к. п. д. зарядки конденсатора через сопротивление

$$\eta=\frac{250}{600}=42\%!$$

Если теперь произвести зарядку через дроссель и выпрямитель, то необходимо, чтобы

$$L=\frac{1}{10f^2C}=\frac{1}{10\cdot 10^8\cdot 5\cdot 10^{-7}}=\frac{1}{500}=2\ \textit{мгн};$$

$$I_{\text{м акс}}=\sqrt{\frac{CU^2}{L}}=\sqrt{\frac{5\cdot 10^{-7}\cdot 10^8}{2\cdot 10^{-3}}}\approx 160\ \textit{а}.$$

Собственное общее сопротивление дросселя и выпрямителя из-за требования $R_A \leqslant 30\%$ чисто омического сопротивления зарядки должно быть

$$R_{Gl} + R_L \leqslant 30 \text{ ом}.$$

Пример с дросселем

Однослойная цилиндрическая катушка без сердечника $L = \frac{\pi^2 D^2 n^2}{l} K \cdot 10^{-9}$ *гн*, где K — коэффициент формы, здесь около 0,8.

Диаметр провода 2 *мм* = 0,2 *см*; $l = \frac{1}{5} n$ *см*;

$$L = \frac{10 D^2 n^2}{\frac{1}{5} n} K \cdot 10^{-9} \text{ гн} \quad (\pi^2 \approx 10);$$

$$L = 50 D^2 n \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-9} \text{ гн};$$

$$L = 40 D^2 n \cdot 10^{-9} \text{ гн}.$$

Примем $L = 2 \cdot 10^{-3}$ *гн*.

Тогда $D^2 n = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-9}} = \frac{1}{2} \cdot 10^5$.

При заданном диаметре $D = 20$ *см*, $D^2 = 400$ и, таким образом,

$$n = \frac{1 \cdot 10^5}{2 \cdot 400} = 125 \text{ витков}.$$

Сопротивление $R_L = \frac{\rho l_{\text{витков}}}{Q}$ при

$$l = D\pi n = 0{,}2\pi \cdot 125 = 25\pi \text{ м};$$

$$\rho = 0{,}017 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

$$Q = 1 \cdot \pi \text{ мм}^2$$

будет

$$R_L = \frac{0{,}017 \cdot 25\pi}{1 \cdot \pi} = 0{,}42 \text{ ом},$$

т. е. оно настолько мало по сравнению с указанным выше общим сопротивлением $\leqslant 30$ *ом*, что им можно пренебречь.

Предусмотренный в зарядном контуре селеновый или другой подобный ему выпрямитель при обратном напряжении 10 *кв*, амплитудном токе 170 *а* и среднем выпрямленном токе

$$I = fCU = 50 \text{ а}$$

должен иметь сопротивление в проводящем направлении ниже 30 *ом*. Как только начнется работа описанного выше устройства,

следует экспериментально определить омическое сопротивление отдельных элементов.

Пример

Селеновый выпрямитель: обратное напряжение 30 *в* на один элемент; число элементов для 10 *кв* 333; допускаемое сопротивление одной шайбы в проводящем направлении при токе 170 *а* (измерить осциллографически) на одну шайбу $\frac{30}{330} = \frac{1}{11}$ *ом*. Такой селеновый выпрямитель применяют очень часто.

В случае применения ламповых выпрямителей, имеющих вследствие постоянного падения напряжения на них (напряжение ионизации 10—15 *в*) очень малое сопротивление, катод должен быть рассчитан для тока 170 *а* при обратном напряжении промежутка анод — катод 10 *кв*.

В продаже имеются тиратроны, удовлетворяющие этим условиям при кратковременной работе.

Напряжение зарядного источника U_Q часто может быть в этом случае ниже, чем при зарядке через сопротивление

$$U_Q = \frac{1}{\sqrt{2}} U_C + IR_{Oi}.$$

Для напряжения заряда 10 *кв* и сопротивления выпрямителя 30 *ом* необходимо

$$U_Q = 0{,}71 \cdot 10^4 + 50 \cdot 30 = 7\,100 + 1\,500 = 8\,600 \ в.$$

Коэффициент полезного действия при этом выше, чем при зарядке через сопротивление.

Мощность, отдаваемая конденсатором при $f = 10^4$ *1/сек*, по-прежнему равна 250 *квт*.

От источника потребляется

$$8{,}6 \cdot 10^3 \cdot 50 = 430 \ квт.$$

При этом

$$\eta = \frac{250}{430} = 58\%$$

против 42% при зарядке через чисто омическое сопротивление.

Так как стоимость выпрямителя может быть значительной, то для установок с кратковременной работой это повышение к. п. д. с 42 до 58%, т. е. на 16%, не так существенно. Поэтому обычно предпочитают названную первой простую зарядку через сопротивление при увеличении токопитающей части установки. Нужно точнее исследовать, будет ли разница между 600 и 430 *квт*, т. е. 170 *квт*, в зарядном устройстве высокого напряжения при планируемой длительности работы выгоднее выпрямителя на 170 *а*, 10 *кв*.

Но схема с зарядным дросселем и выпрямителем вызывает в соответствии с рис. 8 после каждого разряда очень замедленное нарастание тока по сравнению с зарядкой через сопротивление, так что она может оказывать гасящее действие на разряд (гасящий дроссель). Так как техника приборостроения часто требует возможно более высоких пределов рабочих частот, используют, например в стробоскопах, почти повсеместно комбинацию ламповый выпрямитель — зарядный дроссель. Здесь из-за высокой амплитуды тока речь идет только о газонаполненных выпрямительных лампах, например тиратронах, которые действуют как выпрямитель.

5. ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРОВ

При периодических импульсных разрядах через конденсаторы проходит настолько высокая мощность, что даже при низких диэлектрических потерях возникает значительный нагрев.

Если совместно чисто омические и диэлектрические потери составляют в импульсном конденсаторе, например, 1%, то при мощности разряда 250 *квт* выделяемое в конденсаторе тепло составляет 2,5 *квт*. Если применяют воздушное охлаждение, то его обычно легче подводить к диэлектрикам системы из многих параллельно или последовательно включенных конденсаторов, чем к одному большому конденсатору.

Исходя из опыта, получают единообразное пространственное расположение системы конденсаторов, особенно благоприятное в отношении охлаждения, т. е. гарантирующее очень хороший отвод тепла и быстрое установление температурного равновесия. Требуемая емкость набирается из плоских конденсаторов известной конструкции, которые в плоскости их наибольшей поверхности собираются в диски с прорезями. Много подобных дисков соединяется в ребристую систему, обтекаемую потоком охлаждающего воздуха. Из теплотехники известно, что система оребрения дает наилучший теплоотвод в обтекающий воздух; этот теплоотвод особенно хорош, если отдельные ребра имеют прорези. Плоские конденсаторы можно легко органически соединить в такую оребренную систему с прорезанными ребрами; использование плоских конденсаторов дает особенно малую длину выхода потока тепла наружу, так что наступает

очень быстрое выравнивание температуры, соответствующее нагрузке.

Это расположение особенно благоприятно для импульсных генераторов напряжения с искровыми разрядниками со сжатым воздухом как устройствами периодического включения [Л. 3]. В этом случае рекомендуется обдувать систему конденсаторов воздухом от искрового разрядника, который вследствие расширения в дюзе разрядника в большинстве случаев заметно охлаждается.

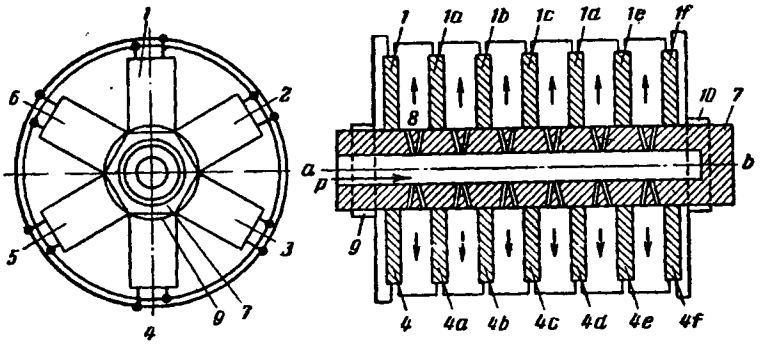


Рис. 9а. Охлаждаемая воздухом конденсаторная батарея малой индуктивности.

Два примера выполнения представлены на рис. 9а и 9b. На рис. 9а показаны вид спереди и продольное сечение такой системы конденсаторов с радиальным расположением ребер, которая предназначена преимущественно для компенсаторов реактивной мощности, а на рис. 9b — вид спереди и продольный разрез системы конденсаторов с продольными ребрами, предназначенной преимущественно для импульсных генераторов напряжений. На рис. 9а конденсаторы *1*, *2*, *3*, *4*, *5* и *6* закреплены радиально на изоляционной трубе *7* с шестигранным наружным профилем. Они образуют дискообразные охлаждаемые ребра с клиновыми прорезами. Как видно из продольного сечения, на изоляционной трубе *7* расположен ряд подобных охлаждаемых ребер, объединенных в единую оребренную охлаждаемую систему. При этом конденсаторы *1*, *1a* и *1b* образуют последовательную цепь, в которой удобнее всего сериесное включение их. Отдельные ряды могут быть соединены параллель-

но. При этой конструкции достигаются также и благоприятные условия для изоляции, так как конденсаторы каждого диска находятся под приблизительно одинаковым потенциалом. Охлаждающий воздух входит в направлении стрелки *p* внутрь изоляционной трубы *7*, которая имеет по периферии выводные отверстия *8*. В случае надобности вся система может непрерывно поворачиваться вокруг своей оси; изоляционная труба *7*

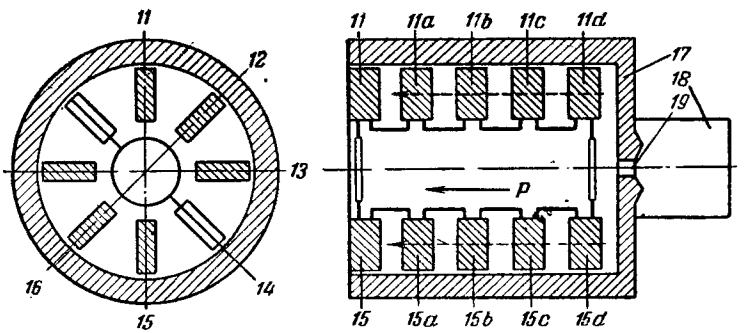


Рис. 9b. Поперечное сечение конструкции иной, чем на рис. 9a.

служит тогда валом и несет контактные кольца *9* и *10*. Тогда даже при очень высокой нагрузке диэлектрика не происходит недопустимого нагрева конденсаторов.

Второй конструктивный вариант показан на рис. 9b. Здесь конденсаторы *11*, *12*, *13*, *14*, *15* и *16* размещены радиально внутри изоляционной трубы *17*, чтобы их бóльшая поверхность была расположена параллельно оси трубы.

Как видно из продольного разреза, при этом расположенные рядом цепи конденсаторов *11*, *11a* и *11b*, представляющие многократно прорезанные охлаждающие ребра, размещены в направлении длины трубы *17*. Непосредственно в конце трубы *17* пристроен искровой разрядник со сжатым воздухом (см. рис. 33 и 34), из корпуса которого *18* расширенный и поэтому охлажденный сжатый воздух протекает через отверстие *19* в трубу *17*. Конденсатары *11*, *11a* и *11b* ... соединены последовательно в цепях, параллельных оси *a—b* трубы *17*, и эти цепи соединены параллельно. Этим путем удается

нагрузить очень большими током и напряжениями установку с очень малым объемом. Отводимая тепловая мощность рассчитывается по обычным формулам для нагревателя в движущемся воздухе [Л. 4].

Рис. 9с показывает конденсаторную батарею, соответствующую рис. 9а, предназначенную для работы с искровым разрядником (импульсная лампа для длительного времени работы с частотой 3 000 разрядов в 1 *сек* с энергией разряда 10 *дж*; бумажные конденсаторы со специальной пропиткой расположены в виде ребер).

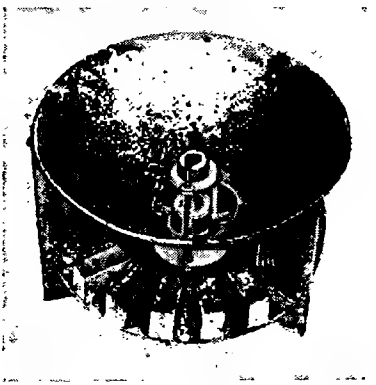


Рис. 9с. Импульсная лампа с охлаждаемой воздухом конденсаторной батареей и искровым разрядником с воздушным дутьем для серии интенсивных вспышек с частотой до 3 000 вспышек в 1 *сек* и мощностью вспышки 10 *дж*.

Для очень кратковременной серии разрядов обычно бывает достаточной собственная теплоемкость конденсаторной батареи, чтобы «баллистически» воспринять возникающее во время разряда тепло.

Для краткого обзора сказанного приводим следующий пример. При средней удельной теплоемкости конденсатора 0,3 *кал/г*° С можно повысить температуру на 1° С при расходе 1,2 *дж* на 1 *г* веса конденсатора; при обычно допустимых для однократного нагрева 100° С может быть поглощено энергии 120 *дж/г*.

Конденсаторная батарея для быстрого следования разрядов, по рис. 4 имеет вес около 3 *кг* при емкости 0,2 *мкф* и зарядном напряжении 10 *кв*, т. е. 10 *дж* энергии. Если эту батарею применяют для высокочастотной вспышки, например, с 5 000 разрядов в 1 *сек* и если принять суммарные потери равными 2%, то при весе 3 *кг* теплота, выделившаяся за одну серию разрядов, может составлять

$$3\,000 \cdot 1{,}2 \cdot 100 = 360 \text{ кдж}.$$

При 5 000 разрядов в 1 *сек* с энергией каждого 10 *дж* в разрядном контуре перемещается 50 *квт*; таким образом, при предположенных нами потерях, равных 2%, в конденсаторе теряется мощность 1 *квт*. Так как конденсатор допускает повышение температуры до

100° С, то при этой нагрузке возможна работа в течение 360 *сек* без применения наружного охлаждения.

В импульсных генераторах для получения световых вспышек обходятся совсем без наружного охлаждения, если съемка фильма проводится с максимальным числом кадров 10^4. Напротив, для исследования импульсной модуляции оптического излучателя требуется непрерывное охлаждение.

Сильный нагрев возникает в том случае, если конденсаторная батарея установлена в разрядном контуре с искровым разрядником, генерирующим ток высокой частоты в течение длительного времени, например в установках для высокочастотной закалки. При калориметрическом измерении потери в керамических горшочных конденсаторах (нагрев сопротивлений, а не угол потерь) составили 2% полной мощности 30 *квт*; таким образом, охлаждением постоянно отводилась мощность 600 *вт*. Хотя несколько минут можно было работать без охлаждения с баллистическим накоплением тепла, но затем должно было действовать масляное охлаждение. При керамических элементах несложно установить и подключить батарею к проточному масляному охлаждению, работающему по принципу термосифона.

К сожалению, почти невозможно рассчитать потери в конденсаторе при импульсной работе, поскольку в расчет должны войти следующие величины, которые часто не могут быть определены: форма импульса, частота, угол потерь для различных частот, поверхностный эффект в конденсаторе, коэффициент сопротивления для каждой из плотностей тока во время импульса, статический и электрострикционный коэффициенты предлагаемой конструкционной формы конденсатора, акустическое демпфирование охлаждающей среды.

Напротив, экспериментальное определение потерь очень просто. Батарею конденсаторов или один конденсатор (рис. 10) помещают в калориметр, который в случае необходимости герметизируют от доступа воздуха и калибруют посредством нагрева лампами накаливания. Возможно также применение простого масляного калориметра, причем объект измерения подвешивается в масле. В последнем случае часто представляется возможность в подобный калориметр также поместить потребитель разряда, например искровую камеру, и оба

термометра могут действовать на один электродинамический логометр, измеряющий отношение температур. Таким образом, возможно прямое определение к. п. д.

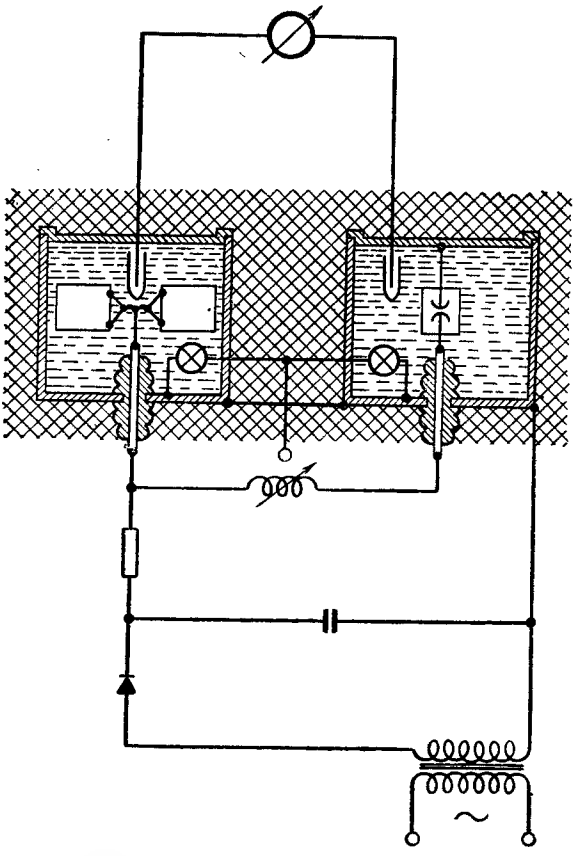


Рис. 10. Простая схема калориметрического измерения общих потерь в конденсаторах при разряде.

в процентах, что при обширном ряде измерений, например изменении индуктивности или газового наполнения искровой камеры в качестве параметров, дает экономию времени за счет устранения работы по калибровке при каждом измерении.

6. КОНДЕНСАТОРНАЯ БАТАРЕЯ ДЛЯ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РАЗРЯДЕ

В импульсных сварочных машинах[1], например при производстве строительных стальных сеток, импульсные сварочные трансформаторы должны с тактом в 1 *сек* соответственно подаче проволочного полотна давать импульсы энергии для сварки. Производство может быть трехсменным, т. е. теоретически 86 400 сварок в день; практически из-за операций по подаче изделий и т. п. бывает только 30 000—40 000. Подобные случаи разряда для многолетней эксплуатации требуют, с одной стороны, значительной средней продолжительности жизни конденсаторов, например 30 000 *ч*, а с другой — при непредусмотренном пробое одного конденсатора производство не должно прерываться или прерываться лишь очень кратковременно. Такая конденсаторная батарея (рис. 11) характеризуется следующими данными, взятыми из практики:

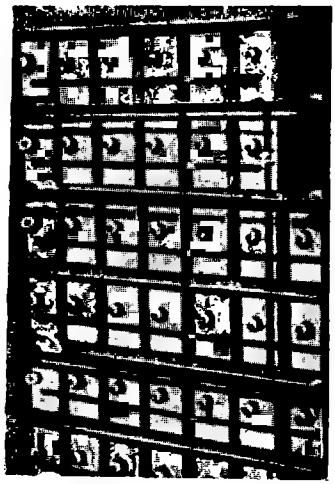


Рис. 11. Пример выполнения конденсаторной батареи большой энергии — конденсаторная батарея 50 *кдж* импульсной сварочной машины. Отдельные предохранители каждого из 100 элементов (40 *мкф*, 5 *кв*).

100 отдельных конденсаторов, 40 *мкф*, 5 *кв*
Общая энергия 50 000 *вт·сек* = 50 *кдж*
Частота разрядов 1 разряд за 1 *сек*

Мощность зарядного выпрямителя 100 *ква* (селеновый выпрямитель с трансформатором, имеющим повышенное рассеяние, без зарядного сопротивления, без потерь активной мощности).

Форма разрядного импульса подобна полуволне синусоиды при 50 *гц*.

[1] Здесь и далее под импульсными сварочными машинами автор подразумевает машины для конденсаторной сварки. (*Прим. перев.*)

Чтобы повысить надежность производства, батарея разделена на упомянутые выше 100 элементов. Преждевременный выход из строя одного из них уменьшает мощность машины всего на 1%. Каждый отдельный конденсатор защищен предохранительной проволокой, выгнутой вверх. В случае пробоя ток остальных 99 конденсаторов проходит через единственный предохранитель дефектного конденсатора и сжигает его. Чтобы при этом уничтожить возможно больше энергии (неуничтоженная энергия может проявиться в форме механической энергии разрыва в дефектном конденсаторе и загрязнять установку, а, кроме того, избыток неуничтоженной энергии может проявляться в чрезмерно бурном разряде целых элементов), предохранитель выполняется из железной проволоки с большими массой и теплотой плавления. Вылет искр и брызг расплавленного металла направляется магнитным полем в строго определенном направлении. Энергией разряда в 1 *квт · сек* можно расплавить около 1 *г* железа. Поэтому для поглощения энергии употребляют 10 *г* и больше проволоки. Если возникающая при перегорании предохранителя дуга затухает вследствие магнитного действия определенной формы проволоки предохранителя и подводящих проводов, то, естественно, можно обойтись меньшей массой проволоки. Это решает только эксперимент.

Охлаждение батареи (при 1% потерь в каждом конденсаторе освобождается около 5 *вт* тепловой энергии) вполне обеспечивается свободным монтажом, тем что воздух может беспрепятственно омывать батарею.

7. КОНДЕНСАТОРЫ С ЧРЕЗВЫЧАЙНО ВЫСОКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В технике измерения излучений наиболее точным измерительным инструментом является так называемый камерный дозиметр. В нем измерительный конденсатор с чрезвычайно высокой изоляцией заряжается до нормального напряжения и после определенного промежутка времени измеряется потеря заряда. Если время измерения растягивается на 1 год, например, при определении годовой дозы рентгеновского излучения, сопротивление изоляции конденсатора должно быть таким высоким, чтобы в течение года измерений не было заметной ошибки из-за собственных потерь конденсатора. Время полу-

разряда поэтому желательно получить 50—100 лет. При емкости конденсатора 1 000 *пф* (практическая величина для измерения излучения величиной от 10 до 300 рентген (*р*) при времени полуразряда 100 лет) собственное сопротивление конденсатора должно быть $3{,}2 \cdot 10^{18}$ *ом*. Амбросену [Л. 1] удалось получить время полуразряда до 2 000 лет, для чего он использовал две полистироловые фольги с расположенной между ними в качестве диэлектрика фольгой из милара (Mylar). Неизбежные отверстия в каждой фольге, которые требуют многослойной изоляции в высоковольтных конденсаторах, здесь при низком напряжении становятся сопротивлениями потерь. Названной комбинацией фольги и многодневной поляризацией напряжением в несколько сотен вольт закрывают каждое отверстие в диэлектрике потенциальным защитным барьером, препятствующим дальнейшей утечке тока. Получающееся таким образом сопротивление изоляции настолько высоко, что оно может быть только экстраполировано по постоянному ухудшению космическими лучами, которые на один-два порядка сильнее разряжают конденсатор, чем его внутреннее сопротивление. Можно достичь времени полуразряда около 2 000 лет, т. е. в нашем расчетном примере достичь сопротивления более $6 \cdot 10^{19}$ *ом*, или $6 \cdot 10^{22}$ *ом/пф*.

Рис. 12а. Образцы для крайне медленного разряда. Различные намотанные конденсаторы для карманных дозиметров Амброзена со временем полуразряда более 100 лет.

Рис. 12а показывает различные подобные конденсаторы с очень высокой изоляцией, которые выполнены как простые маленькие обмотки. Чередование фольги: алюминий — полистирол — милар — полистирол — алюминий.

На рис. 12b показано конструктивное выполнение предлагаемых для дешевого массового производства водонепроницаемых камерных дозиметров (по Кристенсену и Фрюнгелю). Для измерения через отверстие в мем-

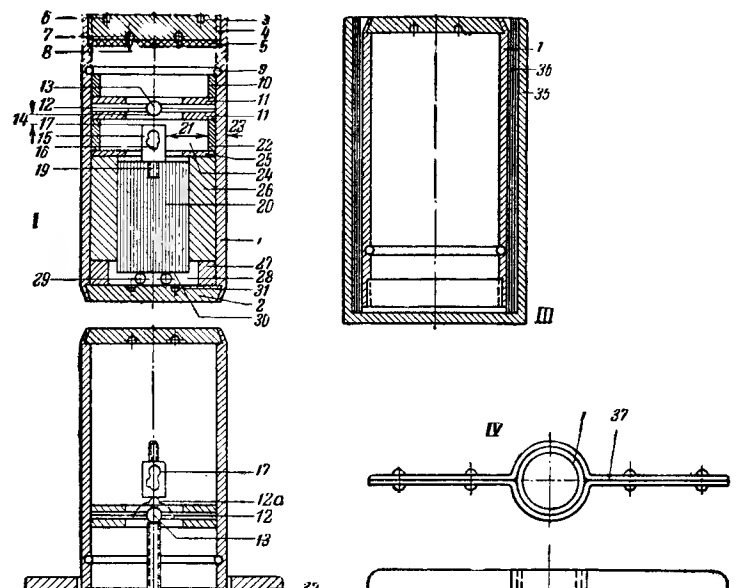


Рис. 12b. Чертеж конструкции карманного дозиметра по Фрюнгелю, Кристенсену и Амбросену с конденсаторами по рис. 12а.

I — разрез через измерительный конденсатор в закрытом состоянии; *II* — разрез через измерительный конденсатор после открытия и введения контактного штифта для отсчета уменьшения заряда; *III* — измерительный конденсатор с наружным покрытием, которое одновременно служит усилением стенок для экранирования мягкого излучения; *IV* — укрепление измерительного конденсатора между пластинками, пригодными для надписей.

1 — алюминиевый стакан; *2* — днище; *3* — верхняя пластина для подключения; *4* — уплотнение; *5* — покрытие; *6* — отверстия для монтажного ключа; *7* — монтажные отверстия; *8* — отверстия в покрытии из мягкого пластика *5*; *9* — пружина и паз для удержания системы; *10* — дистанционное кольцо; *11* — удерживающая шайба для контактной мембраны *12*; *13* — контактная заклепка из благородного металла; *15* — полый контактный корпус изолированной обкладки измерительного конденсатора; *16* — силикагель или осушающая таблетка; *17* — контактная поверхность; *19* — винт контактного корпуса в измерительном конденсаторе; *20* — измерительный конденсатор, соответствующий рис. 12а; *21* — радиус разрядного пространства, в котором ионизирующими лучами образуется носитель разряда; *22* — дистанционное кольцо; *23* — толщина стенки; *24* — действительное разрядное пространство; *25* — графитизированная нижняя ограничительная шайба; *26* — удерживающее покрытие измерительного конденсатора; *27* — установочное кольцо для предохранения диэлектрика от смятия; *28* — маленькое, вносящее погрешность некалиброванное разрядное пространство; *29* — контактное кольцо для соединения с массой заземленной обкладки; *30* — заземленная обкладка конденсатора; *31* — монтажные засверловки; *32* — уплотняющая манжета измерительного прибора; *33* — установочная плита с высокой изоляцией; *34* — измерительный контактный штифт для измерения заряда; *35* — защитная оболочка; *36* — уплотняющий материал или бумага для записи изменений заряда или дозы облучения; *37* — контрольные и крепежные пластины.

бране выталкивается контактный штифт, который потом снова закрывается. На оболочке конденсатора можно поместить бумагу или т. п., на которой записывают найденное значение измеряемого разряда. Подобные дозиметры делаются с емкостями 10, 30, 100, 300 и 1 000 *пф*; они оказываются достаточно хорошо уплотненными, чтобы их можно было закапывать в землю при исследованиях почвы.

В. ВКЛЮЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

1. ТИРАТРОНЫ

При выборе включающего устройства должно быть известно, протекает ли разряд энергии, накопленной в конденсаторе, апериодически или следует ожидать колебаний. В обоих случаях, кроме того, существенны величина ожидаемой амплитуды тока, затем общее количество электричества, протекающее при разряде, и напряжение заряда конденсаторов. Ниже представлены включающие устройства различных видов и возможные применения их для каждой из названных задач. Тиратрон с достаточным основанием можно применять только в том случае, если невозможен или не нужен колебательный разряд. Его можно также применять для того, чтобы при данных параметрах разрядного контура отрезать часть разряда, склонную к колебаниям при первом переходе тока через нуль, и этим устранить всякую возможность колебания. Двумя существенными параметрами тиратронов являются максимальное обратное напряжение и амплитуда тока эмиссии. При повторяющихся разрядах принимают во внимание, кроме того, среднее допускаемое значение катодного тока, а в аппаратах с непрерывной длительной работой также гарантируемый срок службы.

2. МУЛЬТИВИБРАТОР

Для включения разрядов конденсаторов с чрезвычайно высокой точностью, отвечающей точности включающих устройств современной электроники, и практически любой частотой следования следует выбрать мультивибраторную схему. Эта схема состоит в общем из двух триодов со связанными катодами, которые в малых лампах расположены в общей стеклянной колбе. В обычной

мультивибраторной схеме с анода первой лампы отбирается при замыкании контакта положительный или отрицательный импульс напряжения и подается на сетку следующей лампы. При этом на общем катодном сопротивлении возникает импульс тока, который по направлению совпадает с первоначальным током. Этим достигается обратная связь, которая дает повышение тока соответственно виду включения в первой или второй лампе мультивибратора до предела эмиссии. Определяющими мощность такой мультивибраторной схемы являются эмиссионный ток одной из двух ламп (вторая может быть менее мощного типа, так как она служит только для управления первой лампой), а также обратное напряжение, т. е. допустимое катодное напряжение без токовой нагрузки, так как перед процессом опрокидывания включающая лампа обесточена. В качестве комбинированной лампы может быть использован двойной триод, дающий ток эмиссии около 1 *а* при импульсной мощности 500 *вт*, с любой частотой в пределах допустимой термической нагрузки лампы. При использовании двух отдельных ламп выгодно брать генераторные лампы с высокой крутизной характеристики и высокой эмиссией, которые находят применение главным образом в ультракоротковолновой технике.

В радиолокационной технике для включения анодного напряжения на генераторную лампу применяются так называемые модуляторные лампы. Они имеют высокую мощность накала и большой эмиссионный ток, например 100 *вт* и 10 *а*. Анодное напряжение в бестоковом, запертом состоянии может быть 10 *кв* и более. При кратковременном использовании полной эмиссии при наложенном на лампу высоком напряжении можно получить большую импульсную мощность, например, при 10 *кв* и 10 *а* 100 *квт*. Подобная коммутационная техника необходима в импульсных управляемых приборах для того, чтобы чрезвычайно точно управлять сеткой мощных водородных тиратронов. При этом управляющему импульсу можно придать определенную форму, например короткий положительный подъем с последующим отрицательным длинным также мощным «хвостом». Подобные задачи включения могут быть решены практически только соответственно выполненной мультивибраторной схемой. Сама мультивибраторная схема требует для выклю-

чения только чрезвычайно слабого импульса. Малые типы коммерческих мультивибраторов серии ECC могут быть натренированы при подходящих данных схемы до импульсной чувствительности около 10 *мв*. Так как, кроме того, управляющее напряжение может быть подведено относительно высокоомно, применение мультивибраторной схемы позволяет избежать требуемого в про-

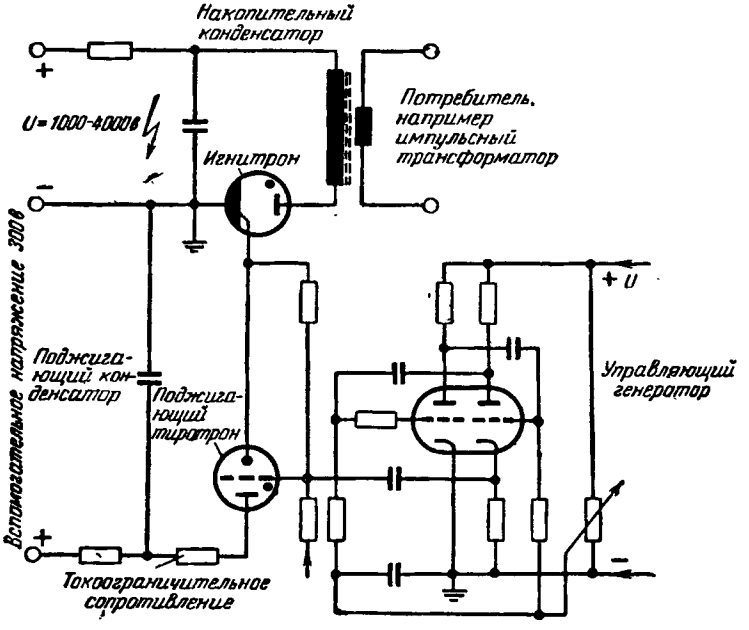


Рис. 13. Схема игнитронного включения конденсаторного контура. Зажигание игнитрона производится вспомогательным тиратроном и мультивибратором.

тивном случае большого числа ступеней усиления и достаточно небольшого усиления обычной усилительной лампой. Нужно обращать внимание на то, чтобы мультивибраторным выключением вследствие резкого разрыва цепи можно было также выключить все нежелаемые помехи и колебания в цепи, которые чрезвычайно быстро затухают.

Но так как при генерировании периодических импульсов интервал между двумя импульсами всегда настолько велик, что следующий выключающий импульс

происходит при сетке, свободной от нарушающего электронного облака, можно конструктивно объединить без специальной экранизации высокомощную мультивибраторную схему с обычным усилительным устройством. Измерениями твердо установлено, что поджигающий импульс мультивибратора со всеми последующими явлениями полностью затухает до следующего импульса.

Рис. 13 показывает в качестве примерной схемы игнитронное включение конденсаторного контура, при котором игнитрон поджигается тиратроном, который включается мультивибратором. Следует обратить внимание на ограничивающие сопротивления, которые обеспечивают допустимые рабочие напряжение и катодный ток.

Как особую форму мультивибратора следует упомянуть так называемый триггер Шмитта — схему, которая независимо от частоты импульсов требует выключающих импульсов одинаковой амплитуды, в то время как мультивибратор с емкостной связью требует для своего запуска постоянной крутизны возрастания напряжения на сетке.

3. СИММЕТРИЧНЫЕ ИОННЫЕ ПРЕРЫВАТЕЛИ

В импульсных сварочных машинах, которые являются сварочными машинами с предварительно накопленной в конденсаторах энергией, точно так же, как и во всех других емкостных разрядных контурах, заряженный конденсатор в произвольный момент должен подключаться к потребителю, например к импульсному сварочному трансформатору. Для этого служит мощный магнитный контактор. Во многих случаях обычно применяемые игнитронные прерыватели не могут применяться в больших конденсаторных импульсных сварочных машинах, так как обратное напряжение таких игнитронов должно быть выше 3 000 *в* и при полной нагрузке импульсного трансформатора вполне возможны токи в несколько тысяч ампер. Подобные игнитронные прерыватели чрезвычайно дороги, так как при колебательном разряде как для положительной, так и для отрицательной полуволны тока нужно иметь по игнитрону и при более длительных колебаниях для положительного и отрицательного полупериодов необходимы управляющие и поджигающие схемы. В противоположность аппаратам,

работающим с частотой сети, в разрядном конденсаторном контуре частота колебаний устанавливается соответственно формуле по емкости и индуктивности рассеяния подключенного трансформатора и его нагрузки, так что органы управления и поджигания должны работать с этой непостоянной частотой. Можно в качестве выключателя применять простую лампу с металлическими парами, например ртути. Если создать на катоде такой лампы достаточную концентрацию ионов, можно в произвольный момент произвести апериодический или колебательный разряд конденсаторной батареи при очень малых внутренних потерях. На некоторых примерах можно составить представление о подобных приборах.

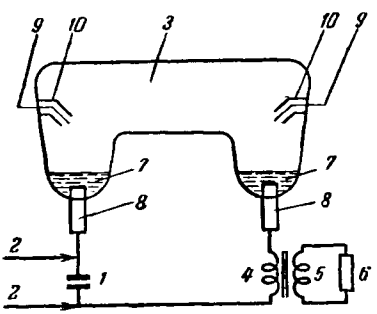


Рис. 14. Включающая лампа с двумя ртутными электродами и поджигающим искровым разрядником.

На рис. 14 заряженный конденсатор *1* подключен к высокому напряжению *2*. Разряд теперь должен идти через баллон *3* в первичную обмотку трансформатора *4*, вторичная обмотка которого *5* обычно нагружена сопротивлением *6*, создаваемым объектом сварки. При применении ртути включающая лампа имеет простейшую форму, представленную на рис. 14 с двумя мениском *7*, которые питаются током через впаянные провода *8* большого сечения. Средняя мощность N_k, отводимая охлаждением от катода, рассчитывается следующим образом: если U_i является напряжением ионизации, соответствующим катодному падению напряжения, то $N_k = U_i I$ рассчитывают, как и в игнитронах, не на пики тока, а только на средний ток.

Чтобы возбудить разряд, в противоположность известной игнитронной схеме включения применяется система поджигающих электродов *9—9*, причем целесообразно поджигающие электроды поместить в стеклянную оболочку *10*, чтобы устранить разряд по поверхности стеклянного баллона *3*. Для зажигания используется им-

пульс высокого напряжения. Можно использовать, например, трансформированный разряд конденсаторов или прямой разряд вспомогательного конденсатора. Благодаря такому сильному импульсу напряжения удается в отличие от используемого в игнитронах погружения полупроводникового штифта в ртуть получить достаточную ионизацию в баллоне за счет настоящего газового разряда и возбудить главный разряд между ртутными электродами *7—7*. Часто достаточно получения отдельных поджигающих искр на электроде.

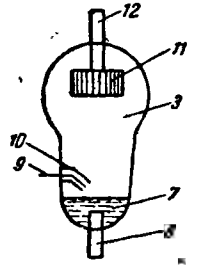


Рис. 15. Включающая лампа с ртутным катодом и графитовым анодом.

В большинстве случаев разряд горит на протяжении многих полупериодов до затухания колебаний, так как в этом случае оба полюса симметричны. Если вторая полуволна имеет меньшую энергию, то, чтобы ее отсечь, можно использовать прерыватель по рис. 15. При этом снова является существенной поджигающая искра, проходящая между *9* и *7* через наполняющий газ или пары, но можно вместо симметричной конструкции описанного выше прерывателя с жидким анодом применить для первого полупериода графитовый анод *11* с выводом большого сечения *12*. Здесь также оказывается полезным отказаться от полупроводникового штифта классического типа и применить открытый искровой промежуток, как показано на рис. 15, который в этом случае приводится в действие, как было упомянуто, импульсным трансформатором. Этот поджигающий искровой промежуток при правильных размерах долговечнее, чем полупроводниковый штифт в игнитронах. Можно срок службы еще более увеличить, если перейти к индукционному внешнему зажиганию. Возможно также емкостное зажигание. При этом в области мениска вокруг стекла располагают металлическую фольгу и зажигают разряд круто возрастающим или высокочастотным импульсом напряжения. Перед емкостным поджигателем включают изолированный конденсатор, что полезно для повышения срока службы вследствие уменьшения электролиза стекла, предохранения стекла от очень малой положительной составляющей тока.

Особенно простая форма выполнения индукционного зажигания показана на рис. 16 (по Клюге и Фрюнгелю). Чтобы удешевить изготовление дорогих ионных прерывателей, достаточно вместо подводимой вспомогательным электродом поджигающей искры воздействовать высокочастотным колебанием посредством катушки *11—12*. Высокочастотный безэлектродный разряд, создаваемый

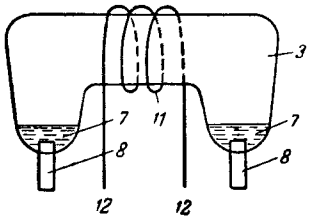


Рис. 16. Индуктрон (дуратрон) с двумя ртутными электродами и поджигающей катушкой.

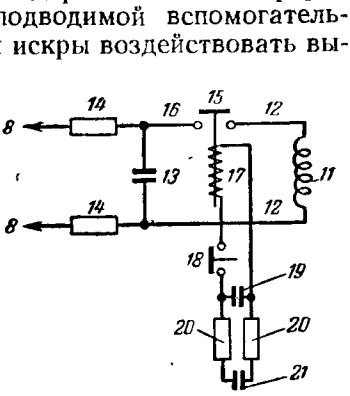


Рис. 17. Включающий контур для получения поджигающих импульсов в катушке по рис. 16.

катушкой, можно использовать для зажигания главного разряда. Для этой цели нужно передать через катушку *11* вспомогательный колебательный разряд мощностью до 2 *квт* при 50-кратном коэффициенте реактивной мощности, т. е. до 100 *ква*. Если включить конденсатор, взаимодействующий с индукционной катушкой, охватывающей баллон, так, что произведение $N = U^2\omega C$ дает реактивную мощность 100 *ква* или более, то создается мощный внутренний газовый разряд в баллоне и пробой зажигания между *7* и *7*. Для нормального действия такого разряда конденсаторов целесообразно заранее позаботиться, чтобы он не мог возбуждаться преждевременно. Для этой цели используют схему по рис. 17. При этом конденсатор *13*, предназначенный для генерирования колебаний, заряжается через зарядное сопротивление *14* высоким напряжением *8 –8*. Целесообразно применять то же высокое напряжение, что и на полюсах прерывателя. При этом можно сварку или разряд конденсатора произвести только тогда, когда на прерывателе имеется полное напряжение, т. е. когда конденсаторная батарея снова заряжена. Разряд конденсатора *13*

проходит через проводник *16* и контакт *15* в проводник *12* и катушку *11*. Можно при этом включающее реле *17* возбуждать через контакт *18*, например, нажимая кнопку, через которую проходит разряд конденсатора *19* на катушку *17*, вследствие чего происходит сильное прижатие контактов *15*. Целесообразно заряжать конденсатор *19* от источника тока *21*, который может представ-

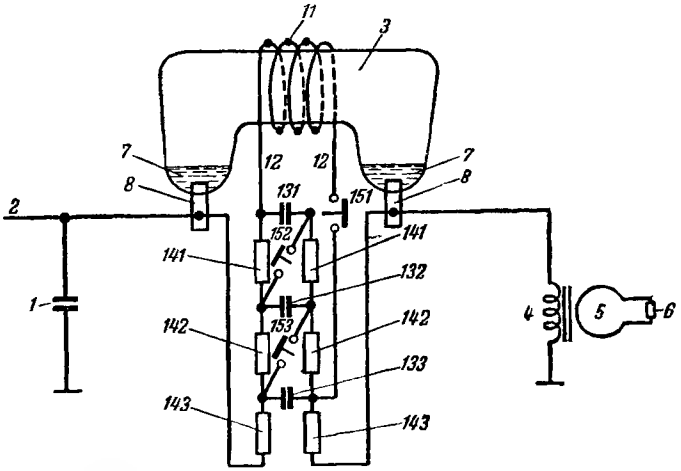


Рис. 18. Индуктрон (дуратрон) с каскадным включением поджигающего контура в импульсной сварочной машине. Поджигающая цепь получает напряжение от напряжения включающей лампы (Фрюнгель—Клуге).

лять, например, заряженный большой конденсатор, через зарядное сопротивление *20* так, чтобы постоянная времени сопротивления *20* и конденсатора *19* была идентична постоянной времени конденсатора *13* и сопротивления *14*. Этим устраняется возможность преждевременного срабатывания реле *15* и разрядки неполностью заряженного конденсатора *13* на колебательную катушку.

Трудности, возникающие при малых эксплуатационных напряжениях прерывателя *3*, устраняются в схеме рис. 18. Если на прерывателе имеется напряжение лишь 2—3 *кв*, то вследствие малой силы поля в баллоне колебания в катушке *11* должны быть значительно сильнее, чем в том случае, когда на прерыватель *3* подано более высокое напряжение, например 4—6 *кв*. Известно, что осуществить зажигание тем легче, чем ближе величина

напряжения перед зажиганием к напряжению пробоя. Чтобы достичь надежного зажигания с большой мощностью в колебательном разряде катушки *11*, служит схема Маркса. При этом конденсаторы *131*, *132* и *133* параллельно заряжаются через сопротивления *141*, *142* и *143*. Они заряжаются тем же напряжением, которое имеется на клеммах *8—8* прерывателя. Для возбуждения зажигания одновременно включаются три контакта реле: *151*, *152* и *153*. При напряжении на лампе, например, только 2 *кв* при описанном трехкратном включении получают на катушке *11—12* необходимое напряжение 6 *кв*. Описанным утроением напряжения можно осуществить надежное зажигание в области напряжений между 1,5 и 6 *кв* при емкости конденсатора *1* от 50 до 5 000 *мкф*. Колебательная реактивная мощность катушки при зажигании значительна.

Пример

Три поджигающих конденсатора по 10^{-9} *ф*. Зарядное напряжение 3 *кв*; при разряде последовательно включенных конденсаторов

$$\frac{1}{3}\cdot 10^{-9}\ \text{ф при } 9\ \text{кв}.$$

Пик тока будет

$$\frac{1}{2}CU^2=\frac{1}{2}LI^2;\quad I=\sqrt{\frac{CU^2}{L}}.$$

При индуктивности поджигающей катушки 100 *мкгн* реактивная мощность

$$N_р=UI=U^2\sqrt{\frac{C}{L}}=81\cdot 10^6\sqrt{\frac{3{,}3\cdot 10^{-10}}{10^{-4}}}\approx 15\cdot 10^4\approx 150\ \text{ква}.$$

Это простое начальное зажигание дает очень значительное возбуждение колебаний в плазме.

Описанная схема применима также для всех других конденсаторных разрядных контуров с относительно низкоомным потребителем и работает также с калием или натрием вместо ртути в качестве наполняющего металла, однако ртуть меньше всего зависит от температуры. При эксплуатации с обратным напряжением 5 000 *в*, импульсе тока 5 000 *а* апериодической или колебательной нагрузки, масляном охлаждении схема нуждается в баллоне емкостью всего только около 2 *л*.

При большой средней мощности (например при частоте импульсов 100 *квт · сек/сек*), равной 100 *квт*, не-

смотря на хороший к. п. д., в прерывателе возникают тепловые потери в несколько киловатт. В таких случаях, как показывает рис. 19, предусматривается охлаждение в масле, причем масло охлаждается водой посредством ребристого охладителя. Чтобы держать постоянным давление паров и тем самым постоянные условия зажига-

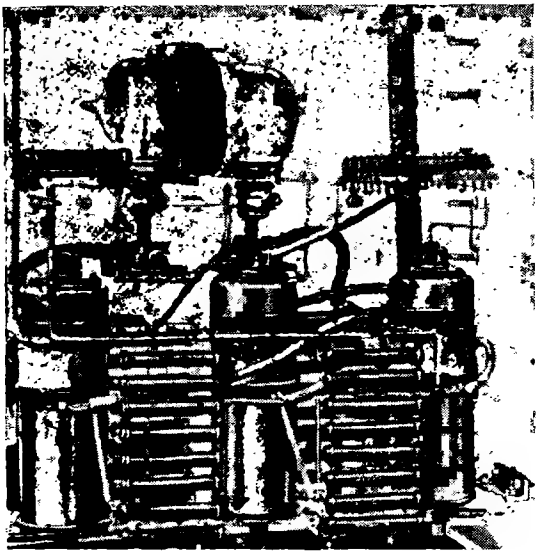


Рис. 19. Внутреннее устройство индукторного включающего устройства. Видны каскады импульсных конденсаторов в центре и справа; сверху расположен индуктрон с поджигающей катушкой.

ния, нужно сохранять постоянной температуру, например 40° С, так чтобы обеспечить достаточное давление паров ртути в баллоне. Но температура и давление не должны также быть слишком высокими, так как тогда напряжение пробоя может сделаться недопустимо низким. При пуске и непродолжительное время после пуска может потребоваться предварительный нагрев прерывателя, который после достижения эксплуатационной температуры сменяется последующим охлаждением для отвода непрерывно образующегося тепла. Если прерыва-

тель охлаждается циркуляционным водяным охладителем, который чаще всего имеет температуру воды 25—40° С, исключается необходимость подогрева при старте.

Вследствие большого срока службы индуктивно поджигаемые диоды называют «дуратронами».

4. ПОДЖИГАЕМЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯДНИК

Искровые разрядники, вероятно, являются старейшими средствами включения разряда конденсаторов. Они не должны еще выбрасываться из измерительной техники высоких напряжений конденсаторного разряда и вообще высоких переменных напряжений, тем более что они представляют собой стандартное средство измерения высоких напряжений. Длина их пробивного промежутка, как известно, зависит от диаметра шара и давления воздуха. Имеются исчерпывающие таблицы для всех измеряемых напряжений и относящихся к ним диаметров шаров (табл. 1a и 1b). Измеряемое напряжение приводится к нормальному барометрическому давлению воздуха и корректируется соответственно показанию барометра. В значительных пределах действия закона Пашена напряжение пробоя повышается и понижается строго пропорционально давлению воздуха.

Простейшая форма включающего механизма сводится к тому, что конденсатор связывается с потребителем через жестко установленный искровой разрядник. Если конденсатор заряжают до напряжения, превышающего пробивное напряжение искрового разрядника (его можно заранее установить с точностью до 3% и более), то происходит искровой разряд. Искра в этом разряднике имеет сопротивление, впервые рассчитанное Теплером. Сопротивление искры с достаточной для технического применения точностью подсчитывается по формуле

$$R_F = \frac{kL}{Q},$$ причем для воздуха $k = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ (см. разд. M).

Здесь L — длина промежутка, *см*; Q — количество проходящего через искровой разрядник электричества,

Таблица 1а

Начальное напряжение симметричных шаровых искровых разрядников

Начальное напряжение при двух одинаковых шарах при симметричном распределении напряжения в воздухе. Давление 760 *мм рт. ст.*, температура 20° С, напряжение в киловольтах.

Пробивной промежуток, *см*	Диаметр шара, *см*											Плоские листы
	1,11	2	2,54	5	6,25	6,66	7,5	10	12,5	15	25	
	Пик	Вайкер	Пик	Вайкер Эсторф Теплер	Пик	Пик	Эсторф	Эсторф Вайкер Теплер	Пик	Вайкер Эсторф Теплер	Пик	
0,05	2,9	—	—	—	—	2,65	—	—	2,65	—	2,65	2,65
0,1	4,95	—	—	—	—	4,60	—	—	4,60	—	4,60	4,47
0,2	8,7	—	8,32	—	—	8,09	—	—	8,04	—	8,04	7,96
0,3	12,0	—	11,6	—	—	11,3	—	—	11,3	—	11,3	11,3
0,4	15,0	—	14,8	—	—	14,4	—	—	14,4	—	14,4	14,4
0,5	17,9	—	17,9	—	17,5	17,5	—	—	17,4	—	17,4	17,4
0,6	20,6	—	21,0	—	—	20,5	—	—	20,4	—	20,4	20,3
0,7	23,3	—	24,0	—	—	23,5	—	—	23,3	—	23,3	23,2
0,8	25,6	—	27,0	—	—	26,4	—	—	26,2	—	26,2	26,1
0,9	27,7	—	29,8	—	—	29,4	—	—	29,1	—	29,0	28,9
1	29,5	32,0	32,5	32,4	32,4	32,2	32,1	32,1	32,0	31,8	31,8	31,7
2	—	52,1	—	59,3	59,7	—	59,7	60,0	60,0	60,0	60,5	59,6
3	—	64,2	—	80,7	82,4	—	83,8	85,4	85,7	86,2	87,3	87,0
4	—	71,9	—	97,7	102	—	104	108	110	110	113,5	114

См. также разд. „М2с"

Продолжение табл. 1а

Пробивной промежуток, *см*	Диаметр шара, *см*											Плоские листы
	1,11	2	2,54	5	6,25	6,66	7,5	10	12,5	15	25	
	Пик	Вайкер	Пик	Вайкер Эсторф Теплер	Пик	Пик	Эсторф	Эсторф Вайкер Теплер	Пик	Вайкер Эсторф Теплер	Пик	
5	—	76,8	—	111	117	—	122	128	131	133	138	140
6	—	—	—	122	129,5	—	136	146	151	154	162	166
7	—	—	—	131	140	—	149	162	169	174	185	192
8	—	—	—	139	150	—	160	176	185	191	205	217
9	—	—	—	145	158	—	170	187	200	207	227	242
10	—	—	—	150	165	—	178	199,5	213	222	247	266
11	—	—	—	—	—	—	185	209	225	236	266	290
12	—	—	—	—	—	—	192	218,5	236	249	283	—
13	—	—	—	—	—	—	198	227	246	260	300	—
14	—	—	—	—	—	—	203	234	255	271	316	—
15	—	—	—	—	—	—	208	241	265	282	331	—
16	—	—	—	—	—	—	—	247	—	291	—	—
17	—	—	—	—	—	—	—	252	—	300	—	—
17,5	—	—	—	—	—	—	—	—	284	304	367	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	299	—	398	—
22,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	424	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	451	—
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	492	—
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	555	—

Таблица 1b

Начальное напряжение симметричных шаровых искровых разрядников, заземленных с одной стороны

Начальное напряжение при двух одинаковых шарах, из которых один заземлен, в воздухе. Давление 760 *мм рт. ст.*, температура 20° С, напряжение в киловольтах.

Пробивной промежуток, *см*	Диаметр шара, *см*									Плоские листы
	0,5	1	2	2,5	5	6,25	12,5	25	37,5	
	Хейдвайллер	Хейдвайллер	Хейдвайллер	Орглер	Мюллер Вайкер	Пик	Пик	Пик	Шабб и Фертескью	
0,01	1,10	1,02	0,993	—	—	—	—	—	—	—
0,02	1,60	1,53	1,52	—	—	—	—	—	—	—
0,03	2,07	2,02	1,97	—	—	—	—	—	—	—
0,04	2,50	2,46	2,38	2,26	—	—	—	—	—	—
0,05	2,92	2,87	2,79	2,67	—	—	—	—	—	2,65
0,06	3,32	3,26	3,18	3,07	—	—	—	—	—	—
0,08	4,08	4,03	3,96	3,86	—	—	—	—	—	—
0,1	4,87	4,80	4,74	4,61	—	—	—	—	—	4,47
0,2	8,51	8,37	8,28	8,20	—	—	—	—	—	7,96
0,3	11,5	11,7	11,6	11,5	—	—	—	—	—	11,3
0,4	14,0	14,8	14,7	14,6	—	—	—	—	—	14,4
0,5	15,9	17,5	17,7	17,6	17,5	17,4	17,4	—	—	17,4
0,6	17,3	20,0	20,7	—	20,4	—	—	—	—	20,3
0,7	18,4	22,0	23,5	—	23,2	—	—	—	—	23,2
0,8	19,3	24,0	26,2	—	26,1	—	—	—	—	26,1
0,9	19,9	25,5	28,6	—	28,9	—	—	—	—	28,9
1	20,5	27,1	31,0	—	31,8	31,9	31,9	31,7	—	31,7
1,1	—	—	—	—	34,5	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 1b

Пробивной промежуток, *см*	Диаметр шара, *см*									Плоские листы
	0,5	1	2	2,5	5	6,25	12,5	25	37,5	
	Хейдвайллер	Хейдвайллер	Хейдвайллер	Орглер	Мюллер Вайкер	Пик	Пик	Пик	Шабб и Фертескью	
1,2	—	—	35,0	—	37,1	—	—	—	—	—
1,3	—	—	—	—	39,9	—	—	—	—	—
1,4	—	—	—	—	42,5	—	—	—	—	—
1,5	—	—	—	—	45,0	45,3	45,8	46,0	—	—
2	—	—	—	—	56,7	58,9	59,5	59,7	—	59,6
3	—	—	—	—	74,6	78,4	85,0	86,0	87,2	87,0
4	—	—	—	—	87,4	92,4	108	111	113	114
5	—	—	—	—	96,6	105	129	136	139	140
6	—	—	—	—	104	114	146	160	164	166
7	—	—	—	—	109	121	162	182	188	192
8	—	—	—	—	114	126	175	203	212	217
9	—	—	—	—	—	131	186	223	235	242
10	—	—	—	—	—	135	197	241	256	266
12	—	—	—	—	—	—	214	274	296	—
15	—	—	—	—	—	—	231	314	351	—
17,5	—	—	—	—	—	—	244	342	392	—
20	—	—	—	—	—	—	253	365	426	—
22,5	—	—	—	—	—	—	—	385	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	402	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	430	—	—
40	—	—	—	—	—	—	—	468	—	—

Для определения эффективного значения переменного напряжения нужно данные таблицы разделить на $\sqrt{2}$.

а·сек. Искра, образующаяся, например, при разряде конденсатора с напряжением заряда 30 *кв* и емкостью 1 *мкф* через искровой разрядник длиной промежутка 1 *см*, будет иметь в соответствии с этим

$$R_F = \frac{0{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^4} = \frac{8}{300}\ ом \approx 27\ мом.$$

Видно, что для обычных значений сопротивления потребителя, на которое должен быть подан разряд конденсаторов, сопротивление искры ничтожно мало. Нужно на это указать, так как часто искра считается местом нежелательно высоких потерь. Один из вариантов самопробивающегося искрового разрядника заключается в том, что один шар искрового разрядника делают колеблющимся и для включения, например пневматически или электромагнитном, один шар приближают ко второму, пока наступит пробой или соприкосновение обоих электродов. При очень высоком импульсе тока возникает опасность приварки шаров. Чтобы предотвратить эту опасность, рекомендуется сделать в шарах небольшие круглые вырезы и так расположить в них массивные вольфрамовые пластинки, заполированные заподлицо с шаровой поверхностью, чтобы шары соударялись вольфрамовыми вставками. При импульсах тока во много тысяч ампер и напряжениях в десятки и сотни киловольт можно беспрепятственно включать искровой промежуток с вольфрамовыми вставками [Л. 7]. Эта форма включения разряда конденсаторов имеет преимущества при включении очень больших энергий с относительно медленным следованием разрядов без требований точности по времени. При очень быстром следовании импульсов термическая нагрузка ведет к разогреву определенной части, например, вольфрамовых пластинок и вследствие термоэмиссии делает сомнительным действие искрового разрядника. Моторные прерыватели выполняют до 500 включений в 1 *сек* [Л. 8]. Достижимая всякий раз точность зажигания основывается на механике. При точном механическом управлении можно достигнуть точности включения около 5 *мксек*.

Пример

Окружная скорость включающего ротора 100 *м/сек* = $= 10^5$ *мм/сек*; эксплуатационное напряженне 8 *кв* соответствует

приблизительно 2 *мм* пробивного промежутка; при разбросе начала искры $\pm 0{,}5$ *мм* получается разброс времени

$$\frac{\pm 0{,}5\ мм \cdot сек}{10^5\ мм} = \pm 5\ мксек.$$

Вариант этого включения механического типа для одиночного произвольного включения импульса или замыкания контактов состоит в том, чтобы искровой промежуток подобно затвору ружья раздвигался, останавливался и из этой остановки выводился электромагнитным спусковым устройством. Сильная пружина затем быстро сближает включающие шары или включающие проводники. Этот способ включения при возбуждении отдельных импульсов одновременно имеет преимущество, заключающееся в том, что в незаряженном состоянии в контуре высокого напряжения безусловно имеется короткое замыкание; таким образом, новая зарядка батареи конденсаторов возможна только после размыкания и разведения включающих контактов. Мощность таких пружинных электромагнитно управляемых включателей для высокого напряжения почти неограничена. Можно осуществлять без особых затруднений включение импульсов мощностью порядка 1 000 *Мвт*. Разведение контактов подобных включателей осуществляется вручную, например нейлоновым тросом для высокого напряжения.

Если возникает желание производить зажигание шарового искрового разрядника точно по времени, например управлять электрическим импульсом, то для этого в качестве включающего устройства имеется так называемый трехэлектродный искровой разрядник. В простейшей форме ставят два шара на удвоенном расстоянии обычного пробивного промежутка при данном напряжении заряда конденсаторов, например при напряжении заряда 30 *кв* на расстоянии 2 *см*. Посредине между этими двумя шарами располагают маленький изолированный металлический штифт, который через очень высокоомные сопротивления подгоняется к среднему потенциалу между обоими шарами. В этом случае он не может своим присутствием произвести зажигание. Если теперь на штифт подать импульс напряжения от маленького конденсатора, который значительно нарушает симметрию, например так, что связывает штифт с одним из двух

электродов, то следствием этого будет непосредственный искровой пробой от другого шара к штифту. Но так как штифт из-за малого поджигающего конденсатора не представляет никакой энергетической возможности для разряда, искра тотчас же перескакивает на другой шар и образует искровой канал. Можно при этом достичь удвоения искрового сопротивления соответственно удвоению пробивного промежутка. Механизм зажигания этого вида существенно ограничен по точности во времени тем, что должен произойти процесс ионизации промежутка между электродными шарами и поджигающим острием. Каждый ионизационный процесс зависит от длины канала, так как необходимое время развития ионизационного канала пропорционально длине пробивного промежутка (табл. 2).

О запаздывании зажигания как функции электродного материала см. у Штригеля [Л. 9].

Таблица 2

Запаздывание зажигания при простейшем зажигании с помощью штифта

Напряжение на конденсаторе, *кв*	Поджигаемый пробивной промежуток, *см*	Время запаздывания зажигания, *мксек*
От 4 до 8	0,3	0,01—0,1
От 15 до 20	1	0,1—1
150	10	1—10

Если высокое импульсное напряжение, которое необходимо подать на поджигающий стержень для обеспечения надежного зажигания, является нежелательным, то для снижения его имеется способ, заключающийся в том, что в месте наименьшего расстояния, т. е. напротив анодного шара, в шаровом или чашеобразном катоде делается отверстие и в этом отверстии концентрично располагается поджигающий штифт (рис. 20).

Целесообразно, чтобы поджигающий штифт немного выступал наружу, например на 2 *мм*. Штифт соединяют через высокоомное сопротивление с катодом и подают на него для зажигания отрицательный импульс такого напряжения, чтобы произошел искровой пробой между катодным штифтом и окружающим краем отверстия. Эту поджигающую искру, которая, например, при диаметре

отверстия 10 *мм* и диаметре штифта 3 *мм* должна перекрыть только пробивной промежуток 3,5 *мм*, можно получить от поджигающей катушки с напряжением 15—20 *кв*; искра ведет к электронной эмиссии с края отверстия и одновременно к сильному искажению поля между обоими шарами. Шары в этом примере включения долж-

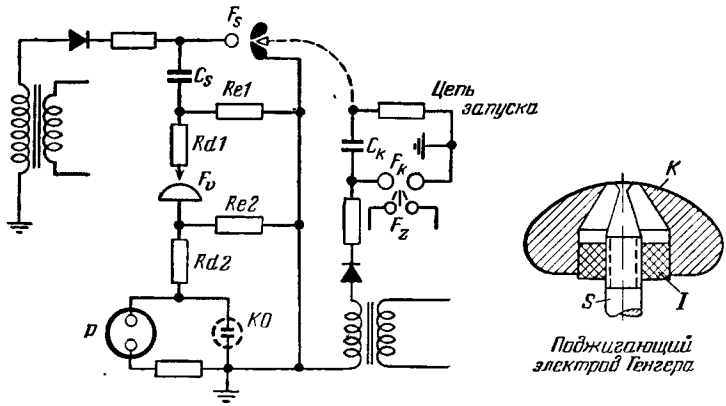


Рис. 20. Трехэлектродный искровой разрядник с концентрическим поджигающим электродом по Генгеру.

C_s — конденсатор (10 000 *пф*); C_k — конденсатор (2 *мкф*); F_s — коммутирующий искровой разрядник; F_v — искровой разрядник делителя; F_k — искровой разрядник управляющей цепи; F_z — искровой разрядник цепи измерения времени; *P* — объект; *KO* — осциллограф; *Rd1*, *Rd2* — гасящие сопротивления; *Re1*, *Re2* — разрядные сопротивления.

Поджигающий электрод Генгера: *K* — шаровой сегмент; *I* — изолирующая прокладка; *S* — медный стержень.

ны быть на расстоянии, максимум на 40% и минимум на 10% превышающем нормальный пробивной промежуток. При этом удается еще надежно возбудить очень большой пробивной промежуток посредством слаботочного вспомогательного напряжения. Поэтому эту схему, которой можно управлять, воздействуя на поджигающий штифт посредством аккумулятора и автомобильной катушки зажигания, охотно используют в лабораториях высокого напряжения. Техника выполнения представлена на примере рис. 20. Поджигатель может при известных обстоятельствах находиться и несколько позади электродного отверстия, если для разряда на штифт подает-

ся энергия зажигания в несколько ватт-секунд. При вспышке разряда возникает акустическая инжекция ионов через отверстие в область главного разряда.

Если электроды подвержены сильному обгоранию, например при высокой частоте импульсов, большом заряде или большой продолжительности работы, или если требуется обеспечить посредством управляемого искрового разрядника чрезвычайно малый разброс порядка 10^{-7} *сек* и меньше, то может быть использовано предложенное автором анодное зажигание; размерный эскиз конструкции такой зажигательной камеры дан на рис. 21.

Оно основано на том, что используются два штифтовых электрода вместо шаровых электродов и вокруг анода расположен поджигающий экран, который имеет чашеобразную форму. Чашеобразный экран имеет отверстие подобно предыдущей схеме, но в этом случае для прохода анодного электродного штифта. Электроды расположены на таком расстоянии друг от друга, которое по схеме Генгера соответствует 1,1—1,4 напряжения. С этой целью делают регулируемым катодный штифт *3*, работающий без поджигающего электрода. Поджигают теперь разряд на окружающей анод тарелке *4* круто возрастающим импульсом. При этом за мгновение до пробоя поджигающей искры возникает чрезвычайно высокая напряженность поля, которое эмиттирует в разрядное пространство чрезвычайно коротковолновое ультрафиолетовое излучение [Л. 10]. Радиус действия этого крайне коротковолнового УФ-излучения одновременно обусловливает границу возможного применения системы. Можно считать радиус действия в воздухе равным примерно 5 *мм*. Пробивной промежуток, который можно надежно поджечь, соответствует примерно двойному радиусу действия этого излучения; таким образом, нельзя превосходить расстояние между электродами свыше 10 *мм* при нормальном атмосферном давлении. При штифтовых электродах, которые имеют больший пробивной промежуток по сравнению с шаровыми, т. е. меньшее напряжение пробоя, 10 *мм* соответствуют напряжению 10—15 *кв* при надежном несамостоятельном пробое. Вследствие коротковолнового УФ-излучения ($\lambda \approx$ $\approx 500 \div 1\,000$ Å) электромагнитного происхождения зажигание возбуждается практически безынерционно, т. е.

в течение менее 10^{-8} *сек*. При этом около половины пространства между катодом и анодом так сильно ионизировано, что от катода появляется вертикальный разрядный столб, что имеет следствием центрированную искру.

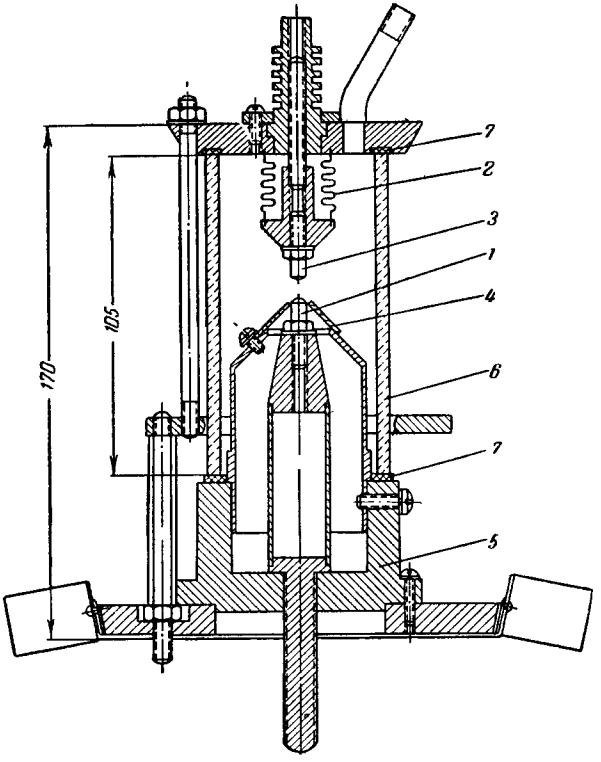


Рис. 21. Чертеж конструкции разборного поджигаемого искрового разрядника с возможным наполнением инертным газом, для максимального разрядного тока 6 000 *а* при напряжении эксплуатации 4—9 *кв* (Фрюнгель).

1 — анодный стержень; *2* — сильфон; *3* — регулируемый катодный штифт; *4* — экран поджигателя; *5* — керамическое основание; *6* — стеклянный цилиндр; *7* — уплотнение.

Такая система разряда может работать как в воздухе, так и в инертных газах, причем последние имеют преимущество, так как уменьшение окисления делает срок службы чрезвычайно высоким. Амплитуда тока также

может быть высокой. Можно передать потребителю токи с амплитудой до 10^4 *а* при эксплуатационном напряжении 4 000—9 000 *в* соответственно описанной выше особенности этой системы поджигания. Импульсная мощность на омическом приемнике, таким образом, составит $\leqslant 10^8$ *вт*. Преимуществу почти любой точности зажигания противостоит недостаток узкого ограничения напряжения. Преимуществом является также легкая замена вольфрамовых штифтов, служащих главными электродами. Для управления таким трехэлектродным искровым разрядником, чтобы его преимущества могли быть полностью использованы, нужно произвести соответствующие затраты на генератор поджигающих импульсов. Можно использовать очень мощный водородный тиратрон, включаемый мощным мультивибратором. Если дополнительно должна быть выдержана минимальная частота включений, например, 10—100 включений в 1 *сек*, причем в искровом разряднике остается некоторое количество ионов, то можно быть уверенным при этом расположении электродов, что средний разброс времени между пробоем поджигающей искры и главным разрядом лежит значительно ниже $3 \cdot 10^{-8}$ *сек*. Дополнительно нужно упомянуть, что этот способ включения нечувствителен к колебаниям и не тушится самопроизвольно. Если пытаются подобной электродной системой посредством пропорционального увеличения всех размеров работать при напряжениях свыше 10 *кв*, то наблюдают также надежное зажигание, однако с большой неточностью. Оно, например, при напряжениях 20—100 *кв* не лучше, чем прежде описанное поджигающее устройство с чашеобразным катодом по рис. 20 и центральным стержневым зажиганием на катодной стороне. Так как инертный газ аргон по сравнению с воздухом имеет в 2—3 раза больший пробивной промежуток, можно с успехом использовать работу такой электродной системы под давлением наполнителя 2—3 *ат* *, причем более высокое давление имеет следствием более крутой пробой (больше частиц) и лучшее конвекционное охлаждение электродов.

Предельная тепловая нагрузка этого типа искрового разрядника для объема камеры около $^1/_4$ *л* и с цилинд-

---

* Здесь и далее давление избыточное.

ром из прочного стекла допустима до 250 *вт*, если не используется форсированное охлаждение любого вида. Искровое сопротивление составляет 1—0,1 *ом*, так что при внешнем сопротивлении 1—10 *ом* в качестве полезной нагрузки при длительной эксплуатации можно передавать 1—10 *квт*. В данном случае рекомендуется наполнение водородом, который имеет очень малое искровое сопротивление, соответствующее малой искровой постоянной Теплера. Так как корпус разрядника выполняется разборным, последующее наполнение его газом из баллона через автоматический вентиль не представляет проблемы, так что трудности продления срока службы запаянного водородного тиратрона здесь устранены.

5. УДАРНЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

Выключатель высокого напряжения для конденсаторного разрядного контура импульсных сварочных машин

В качестве выключателя больших количеств энергии 1—100 *квт · сек* при токе несколько килоампер при относительно медленном разряде, как, например, при импульсной сварке со временем 1/1 000—1/30 *сек*, оказывается пригодным описанный ниже ударный включатель. Он работает в воздухе, и следует избегать образования искры при включении. У конденсаторных сварочных машин, как известно, заряд конденсатора передается через соответствующий выключатель в первичную обмотку сварочного трансформатора, вторичная обмотка которого подводит трансформированный импульс тока к объекту сварки как потребителю.

Процесс включения имеет недостаток, заключающийся в том, что возникает очень сильная искра включения. Она перекрывает промежуток между контактами еще до их соприкосновения вследствие наличия высокого напряжения так, что процесс разряда конденсатора часто заканчивается прежде, чем контакты соприкоснутся. Ясно, что появление этой искры включения крайне неблагоприятно воздействует на процесс сварки.

Если на два электрода, установленных на определенном расстоянии, подать электрическое напряжение, то, как известно, протекает определенное время до возникновения пробоя. Это время запаздывания составляет

10^{-7}—10^{-4} *сек* и сильно зависит от структуры электродного материала. Теоретически можно так повысить скорость контактов, чтобы контактирование происходило за время 10^{-7} или 10^{-8} *сек*, т. е. быстрее, чем может образоваться искра включения. Однако такая скорость едва ли может быть достигнута на практике, так как для этого потребуются такие технические средства, затраты на которые не могут быть оправданы. Кроме того, ско-

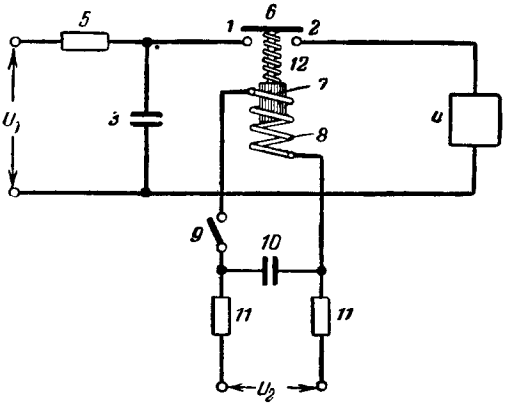


Рис. 22. Цепь разряда конденсатора с ударным выключателем.

рость ограничивается свойствами материала. Однако если электроды сделаны из металла, который имеет склонность к образованию окисного слоя, задерживающего электроны, как, например, медь, то искровой пробой наступает после 10^{-4} *сек*. Это объясняется тем, что электроны проводимости и фотоэлектроны захватываются в слое окислов в результате полупроводникового эффекта.

Можно создать выключатель высокого напряжения для конденсаторного разрядного контура, который при использовании приведенных выше фактов препятствует развитию искры включения также и при периодических включениях. Решение состоит в том, что соответственно рис. 22 подвижные контакты *6* выключателя, сделанные из сильно окисляющегося металла, вследствие действия импульса тока, получаемого во вспомогательном контуре *10*—*8* с частотой, соответствующей частоте сварки, дви-

жутся так быстро по направлению к противолежащим контактам *1—2*, что до контактирования не происходит пробоя и затем они отбрасываются назад пружиной *12* с заранее заданной скоростью. Импульс тока, необходимый для перемещения контактов, образуется в результате разряда вспомогательного конденсатора *10*, и этим импульсом железный сердечник *7* со связанными с ним подвижными контактами *6* втягивается в катушку *8*, причем постоянная времени зарядки вспомогательного конденсатора *10* через сопротивления *11* больше, чем постоянная времени зарядки главного конденсатора *3* через его сопротивление *5*. Далее сила обратной пружины *12*, а также электрические величины сопротивлений *11* в цепи зарядки вспомогательного конденсатора устанавливаются такими, чтобы проходящий через сопротивления ток не был достаточным для удержания железного сердечника в катушке против действия пружины.

При этом существенно, что после каждого включения только несколько молекулярных слоев толстого окисного покрытия контакта самостоятельно обновляются на воздухе, так что выключатель всегда готов к работе.

Конденсатор *3*, заряжаемый до напряжения U_1 через сопротивление *5* посредством контактов *1—2*, замыкаемых ударом мостика *6*, разряжается на полезную нагрузку *4*. Механический импульс для движения *6* создается разрядом конденсатора *10* через управляемый выключатель *9* на катушку *8*, которая втягивает железный сердечник *7* в свое поле. Конденсатор *10* заряжается через зарядные сопротивления *11* до напряжения U_2. Постоянная времени *10—11* должна быть больше, чем *5—3*.

Само собой разумеется, можно ударное движение контактов также производить чисто механически или пневматически. В экспериментальной технике так называемых тороидальных разрядов используют в настоящее время ударные выключатели до 10^5 *а* при 20 *кв* для разряда громадных конденсаторных батарей.

6а. БЕЗЫНЕРЦИОННЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯДНИК ДЛЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ РАЗРЯДОВ

Вообще для включения разрядного контура можно применить простые искровые разрядники. Но в технике больших мощностей они должны конструироваться ина-

че, чем общепринятые шаровые искровые разрядники, так как последние подвержены сильному обгоранию и поэтому быстро становятся технически непригодными.

Описанная ниже методика дает возможность стабильной длительной работы искровых разрядников, в особенности для получения импульсов напряжения с высокой частотой разрядов. Если подают на искровой разрядник круто возрастающее напряжение, которое, например, на 20% выше, чем статическое пробивное напряжение, то проходит определенное время до возникновения искры. Это время зависит от структуры металлических поверхностей или покрывающего их слоя окислов. Металлы с малой работой выхода электронов имеют малое время запаздывания. У алюминия и магния оно имеет величину порядка 10^{-7} *сек*. Другие металлы, такие, как например, медь, покрываются тонким слоем закиси, который тормозит или полностью прекращает выход электронов из поверхности металла. У этих металлов может пройти много микросекунд до пробоя искры при заданном пробойном напряжении. С другой стороны, в искровых разрядниках, которые при длительной эксплуатации работают с очень высокой нагрузкой, приведенные металлы имеют наибольший срок службы и используются на практике как электродный материал в высокочастотных искровых генераторах с разрядниками с воздушным дутьем. Здесь прежде всего при получении высоких мощностей или большого числа импульсов, числа искровых разрядов от 1 000 до 100 000 в 1 *сек* между искрами проходит такое малое время, что медь не успевает покрыться слоем закиси. Вследствие этого описанное выше замедление образования искры происходит только перед первыми зажиганиями и больше не проявляется. Если, однако, такой разрядник часто включает и выключает, то при включении трансформатора высокого напряжения возникают значительные перенапряжения из-за наличия слоя закиси, мешающего искровому пробою. При включении конденсатора высокого напряжения, рассчитанного на номинальное рабочее напряжение, такие импульсы напряжения часто достигают удвоенной величины, т. е. границы пробоя, прежде чем сработает искровой разрядник. Для пробоя твердого диэлектрика конденсатора при таких напряжениях достаточно только нескольких микросекунд; он

происходит быстрее, чем пробой в замедленно работающем искровом разряднике. Для устранения этого недостатка нужно значительно увеличивать конденсаторную батарею в схемах с искровыми разрядниками, так, чтобы она надежно выдерживала импульсы напряжения включения разрядника. Однако стоимость изготовления конденсаторов одинаковой емкости приблизительно пропорциональна квадрату напряжения. При импульсе напряжения включения, равного двойному рабочему напряжению, что обычно принимается в высокочастотных генераторах, вследствие увеличения емкости конденсаторов до эксплуатационной надежности получается такое удорожание установки, что она, несмотря на разнообразные преимущества, например, по сравнению с ламповыми генераторами высокой частоты, имеет ограниченную конкурентоспособность. Но конденсаторы являются только одной из многих частей схемы, для которых импульсы перенапряжения представляют опасность.

Можно при применении небольших конденсаторов пойти на то, чтобы искровой разрядник с воздушным дутьем, имеющий медные электроды, снабдить дополнительным предохранительным искровым разрядником, изготовленным из металла, который не дает замедления искры, например алюминия. Однако в этом случае каждый раз, когда при включении наступает импульс перенапряжения, получают срабатывание предохранительного искрового разрядника с образованием дуги. Установка выключается и затем снова включается до тех пор, пока не достигнет перехода через нуль сетевого напряжения и вследствие этого в установке не возникнет перенапряжений. Так как в некоторых областях применения, например при поверхностной индукционной закалке стали, такой процесс недопустим, ибо он может привести к браку изделий, то остается открытым только названный путь увеличения конденсаторной батареи.

Явления перенапряжения не происходит, если при легко обгорающем искровом разряднике, который изготовлен из материала с затрудненным возникновением искры, предусматривается комбинированная конструкция с применением металла с хорошим началом поджигания. На рис. 23 противоположно стоящие электроды *1—1* образуют искровой разрядник с воздушным дутьем, в который вдувается поток воздуха *2*, выходящий в на-

правлении *3* коаксиально искровому разряднику. Самое узкое место между электродами — *4*. Там начинается, как правило, искровой разряд. Около самого узкого места, у *5*, в разрядный промежуток вставлено некоторое количество стержней из другого металла, например алюминия. Если возникает перенапряжение, то первая искра образуется между активными поверхностями штифтов

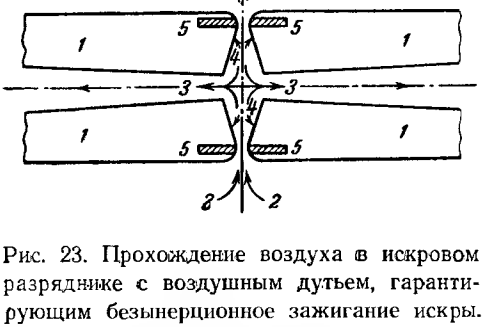


Рис. 23. Прохождение воздуха в искровом разряднике с воздушным дутьем, гарантирующим безынерционное зажигание искры.

1 — медный сплав, имеющий большую теплоемкость и высокую теплопроводность, с хорошей прочностью против выгорания; *2* — направление входящего воздуха; *3* — направление выходящего по оси воздуха; *4* — поверхности с увеличивающимся по направлению к оси расстоянием; *5* — вставка из металла с малой работой выхода электронов, например из алюминиевого сплава, для безынерционного начала искры.

5—5 и сжатым воздухом тотчас же выгоняется на рабочее место *4*. Следующие искры образуются тогда уже между *4—4*, так что не происходит обгорания у *5*.

Можно выбрать также конструкцию, соответствующую рис. 24, при которой вокруг каждого электрода *1—1* расположено кольцо *2*, изготовляемое из металла, дающего легкое зажигание и имеющее такие размеры, чтобы минимальное расстояние *2—2* было на очень малую величину больше, чем минимальный зазор между *1—1*, например расстояние между кольцами в месте *3* равно 3,5 *мм* и 3,0 *мм* между электродами в месте *4*. Если расстояние выбирают одинаковым, то вследствие лучших условий зажигание возникает всегда в месте *3*, с сильным обгоранием материала *2*. Это обгорание продолжается до тех пор, пока расстояние *2—2* не

сравняется с *1—1*. Такое обгорание вызывает со временем изменение характера искрового разрядника. Поэтому целесообразна конструкция по рис. 24, которая уже в первый момент включения дает стабильные показатели. Так как каждый электрический разряд зарождается на катоде, необходимо снабжать вспомогательным материалом, облегчающим образование искры, только катод искрового разрядника, работающего на по-

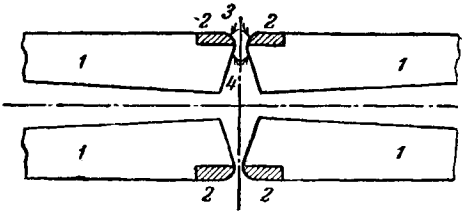


Рис. 24. Выполнение искрового разрядника с воздушным дутьем с алюминиевыми кольцами, расположенными на поверхности для простой обработки на токарном станке, предназначенного для длительной эксплуатации в высокочастотном генераторе.

стоянном токе. При электродах, работающих на переменном токе, обеспечивается беспрепятственная работа искрового разрядника при перенапряжении, если только катод изготовлен, например, из алюминия и соответствующий ему анод — из любого другого проводящего материала. На практике для удобства изготовления предпочитают концентрическое расположение.

Дальнейшую область применения представляют вращающиеся выпрямители и инверторы высокого напряжения. Здесь в зависимости от обстоятельств требуется вызвать разряд либо как можно быстрее после перехода через нуль переменного напряжения, либо после сближения электродов и этим устранить прерывность. Здесь также целесообразно применить для первой искры металл, дающий легкое зажигание, в то время как главная дуга горит между трудно изнашивающимися электродами из обычно применяемого материала.

Для защиты от молнии служит устройство по рис. 25, в котором мало изнашивающиеся главные электроды *1—1* снабжены металлическим кольцом *2*, изготовлен-

ным из материала, обладающего особенно малой затяжкой времени при образовании искрового разряда. После того как загорается разряд между *2—2* вследствие самопроизвольного отшнуровывания дуги, главная термическая нагрузка переходит на *1—1*. В схемах такое устройство включают обычно между антенной и землей. Подобная конструкция также выгодна в технике так называемого вентильного разрядника для защиты воздушных линий от удара молнии, т. е. сильноточных атмосферных конденсаторных разрядов.

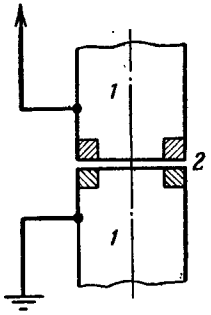


Рис. 25. Выполнение искрового разрядника с параллельными поверхностями, имеющими очень малый зазор, для грозовой защиты схем низкого напряжения.

Безынерционная конструкция искрового разрядника имеет, таким образом, всегда электроды из двух различных металлов, из которых один служит для безынерционного отвода первого искрового пробоя, а второй устойчив против обгорания при длительной работе. В электродах при известных обстоятельствах можно металл заменить углем или другим неметаллическим проводником.

При длительной эксплуатации в искровом высокочастотном генераторе системы Маркса такой искровой разрядник при межэлектродном расстоянии 3 *мм*, диаметре 40 *мм* и расходе воздуха 6 $м^3/мин$ расходует мощность 35 *квт* при отдаче 25 *квт* высокой частоты. Число искр $\sim 10^4$ в 1 *сек*, энергия разряда искры $\sim 3{,}5$ *дж*. После 50—100 *ч* эксплуатации электроды слегка протачиваются на токарном станке для устранения мелких неровностей (см. схему рис. 38).

6b. ВЕНТИЛЬНЫЙ РАЗРЯДНИК

Своеобразным включающим устройством, которое должно быть здесь упомянуто из-за своего обширного распространения, является так называемый вентильный разрядник. Этот искровой включатель, смонтированный параллельно воздушной линии высокого напряжения, имеет задачу немедленно отводить в землю чрезвычай-

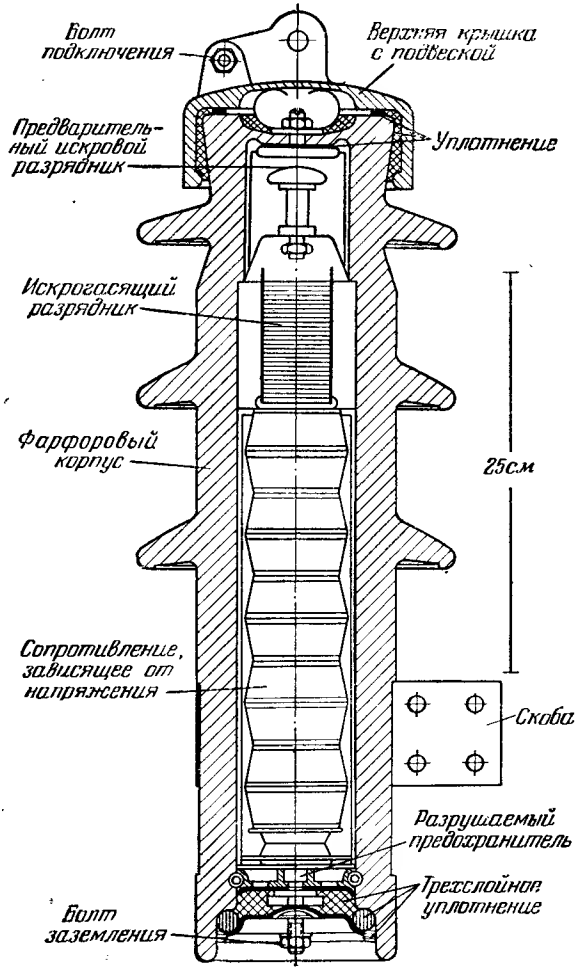


Рис. 26. Вентильный разрядник (внутреннее строение).

ные перенапряжения, возникающие при ударе молнии, и тушить загорающуюся при этом дугу, питаемую мощностью сети.

На рис. 26 показан разрез вентильного разрядника. Предварительный искровой разрядник, который должен срабатывать при установленной величине перенапряже-

ния, пробивается бегущей волной удара молнии, и напряжение с очень крутым фронтом пробивает последующий гасящий искровой разрядник. Чтобы избежать аварийного короткого замыкания, включено соединенное с землей керамическое сопротивление, величина которого при напряжении сети может составлять несколько мегом, причем это значение черзвычайно быстро снижается с возрастанием напряжения. Поэтому импульс перенапряжения немедленно отводится в землю и вблизи перехода через нуль переменного напряжения искровой разрядник гаснет вследствие токового «голода» при уменьшении тока ниже необходимого для поддержания дуги. Искра в искровом разряднике также затухает.

Этот так называемый вентильный разрядник из-за падения напряжения в каждой катодной шайбе искрового разрядника чрезвычайно надежный конструктивный элемент для отведения импульсов перенапряжения в землю. Эти разрядники могут также быть полезными в лабораторной технике в качестве предохранителей напряжения, а также для других задач включения отдельных импульсов определенной наименьшей величины, причем приобретение их (они представляют собой массовое изделие) и для высоких значений напряжения не является обременительным.

7. ДЕЙСТВИЕ ВКЛЮЧАЮЩИХ РЕЛЕ ПРИ ЗАДАННОМ ФАЗОВОМ УГЛЕ

В некоторых случаях нужно производить замыкание контактов при заданном фазовом угле, например при включении конденсатора, который в качестве фазовращателя заряжается переменным током и имеет постоянно меняющийся потенциал. Здесь возможна техника включения, рассмотренная ниже. Она вообще действительна для элементов электромагнитного действия, включающих разряд конденсаторов.

Если на магнитную катушку электромагнитного контактора подают предусмотренное конструкцией возбуждающее напряжение, то появляется обусловленное напряжением и индуктивностью катушки магнитное поле, которое приводит к включению рабочих контактов.

Время, проходящее между приложением напряжения к катушке и замыканием контактов, имеет практически

очень большой разброс. Разброс времени, в особенности при питании магнита переменным напряжением, от 50 до 250 *мсек*, не удается устранить так как он сильно зависит от фазового положения напряжения в момент включения. Если разряжают конденсатор на катушку рабочего магнита электромагнитного контактора, то можно при правильном выборе величины энергии конденсатора перевести электрическую энергию, запасенную в конденсаторе, в кинетическую энергию подвижной системы и этим получить постоянное время процесса включения.

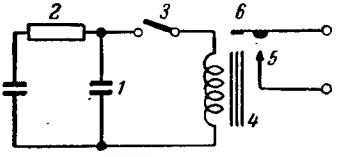


Рис. 27. Принципиальная схема для замыкания контакта при заданном фазовом угле.

Соответствующая схема представлена на рис. 27. Конденсатор *1* заряжается через сопротивление *2* от источника постоянного напряжения. Если замкнуть контакт *3*, то разряд конденсатора воздействует на электромагнит *4*, который приводит в движение якорь *6*, связанный с контактной системой *5*. Протекание процесса во времени показано на рис. 28; по абсциссе отложено время.

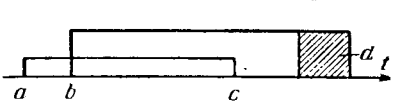


Рис. 28. Диаграмма работы точного по фазе включающего устройства, управляемого реле.

Выключатель *3* замыкается в точке *a* и остается включенным до точки *c*. Замыкание контакта *5* происходит позднее в точке *b*. Расстояние *a—b* обусловлено при постоянном заряде конденсатора *1* и одинаковых типах контактора только его механикой и остается постоянным. Если разомкнуть в точке *c* включатель *3*, то контакт *5* разомкнется внутри области рассеивания *d*, так как, кроме постоянной механической силы обратной пружины, на якорь воздействует непостоянное остаточное намагничивание сердечника *4*. Вследствие малого рассеивания остаточного намагничивания, зависящего от случайной величины воздушного зазора, например вследствие небольшого перекоса якоря, рано или поздно сила обратной пружины становится больше, чем сила остаточного намагничивания, и

это приводит к размыканию контактной системы. Область рассеивания не может быть уменьшена при этом виде включения.

На рис. 29 показана синусоида напряжения, причем задача может заключаться в том, чтобы включение контакта *5* (рис. 27) произвести в заданном месте этой кривой, например при переходе через нуль, в точке *b* (рис. 29). Посредством электромагнитного контактора *1* на рис. 30, например поляризованного реле, контактный якорек *2* периодически перемещается между контактами *3*—*4*; катушка возбуждения этого реле посредством фазовращателя, состоящего из конденсатора

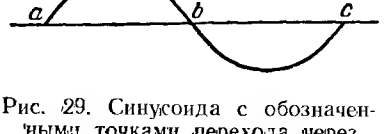


Рис. 29. Синусоида с обозначенными точками перехода через нуль.

Рис. 30. Совершенная схема реле и контакторов для точного по фазе включения контакта *19* при заданном фазном угле, например переходе сетевого напряжения через нуль.

5 и сопротивления *6*, управляется с заданным фазовым углом падением напряжения на сопротивлении *7* переменного сетевого напряжения, стабилизированного железо-водородным бареттером *7a*. Рис. 32 показывает синусоидальную кривую *a* переменного напряжения, возникающего на сопротивлении *7* (рис. 30). Контактный якорек *2* в течение интервала времени *b* замыкает контакт *3*, а в интервале *c* — контакт *4*. Диаграмма, представленная на рис. 32, соответствует осциллограмме, снятой с прибора, построенного для управления с ча-

стотой 50 *гц*. Длительность и положение интервалов *b* и *c* регулируется в известных пределах величиной возбуждающего напряжения и его положением по фазе, на практике сдвигом по фазе на ±30°. Легкий контактный якорек *2* и является собственно управляемым по фазе включающим органом. Для управления электромагнитным контактором *18—19* с желательным сдвигом по фазе замыкают в соответствии с рис. 30 контакт *8*. При последующем касании *2* и *4* конденсатор *9*, заряженный через со-

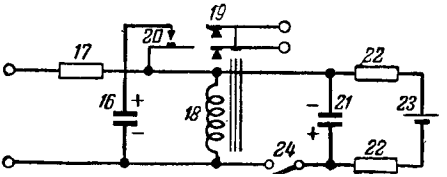


Рис. 31. Дополнительная схема для точного по фазе выключения снижением остаточного намагничивания во включающем контакторе посредством дозированного разряда конденсатора.

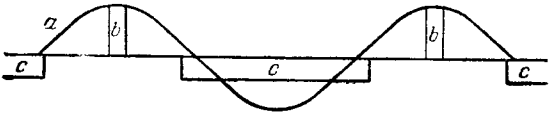


Рис. 32. Регулировочная схема замыкания контакторов за время *b* и *c* по отношению к кривой переменного напряжения *a*.

противление *10* от источника постоянного тока, разряжается на катушку *11*, которая замыкает контакт *12* с постоянным временем запаздывания, соответствующим промежутку *a—b* на рис. 28. Контакт *12* связан теперь с контактом *3* таким образом, чтобы за время *b* (рис. 32) конденсатор *13*, заряженный через сопротивление *14* от источника постоянного тока, замыкался через заданный фазовым положением контактный якорек *2* на контактную систему *15*. Таким образом, можно в произвольный момент замкнуть контакт *8;* в этом случае при ближайшем замыкании *2—4* начнет работать реле *11—12*, и тогда при кратком замыкании контактов *2—3*, которое точно действует в определенном фазовом положении, соответствующем интервалу времени *b* (рис. 32), включается реле *14—15*. Теперь можно использовать кон-

такт *15* для того, чтобы передать заряд конденсатора *16*, заряженного через сопротивление *17*, в рабочую катушку *18* контактора, замыкающего контакт *19*. Интервал времени между замыканиями контактов *15* и *19* тоже постоянный в соответствии с рис. 27 и 28. Если это время составляет, например, 10 *мсек* и интервал времени между замыканием *2—3* и срабатыванием реле *14—15* составит 2 *мсек*, следовательно общий интервал 12 *мсек*, то нужно предварительно посредством правильной установки фазовращателя *5—6* привести замыкание контактов *b* (рис. 32) в соответствие с этим временем. При частоте сети 50 *гц* длительность полного периода составляет 20 *мсек*, соответствующих 360°. После каждых 10 *мсек* (соответственно 180°) возникает равное по абсолютной величине напряжение. Следовательно, время, равное 2 *мсек*, соответствующее фазовому углу 36°, принятое для замыкания контактов *2—3*, должно быть правильно установленным по фазе, например при прохождении напряжения через нуль. Для включения в максимум напряжения задаются углом 90°. Конечно, можно другой установкой фазовращателя *5—6* (рис. 30) получить любое другое соотношение во времени, так чтобы замыкание рабочих контактов *19* неизбежно происходило в заданном месте кривой напряжения после замыкания контакта *8*. Чтобы избежать размыкания реле *11—12* и *14—15*, целесообразно каждое из них снабдить блокировочным удерживающим контактом, который после первого же касания контактов производит не показанное на рис. 30 перекрытие контактов *2—3* и *8* для реле *11—12* и контакта *12* для реле *14—15*.

Чтобы размыкать контакт *19* в заданном фазовом положении без зоны разброса *d* (рис. 28), разработана схема гашения магнитного поля катушки. В соответствии с рис. 31 включающий магнит *18* подключают через сопротивление *17* к постоянному току, после чего при срабатывании реле *18—19* вспомогательным контактом *20* отключается конденсатор *16*. Конечно, при известных обстоятельствах, если полностью отказываются от точного включения по фазе, можно обойтись только катушкой *18*, питаемой постоянным током через последовательно включенное сопротивление *17*. Для точного по фазе размыкания контактов *19* служит противоположно поляризованный конденсатор *21*, который питается через со-

противления *22* от источника постоянного тока *23*, подключенного через контакт *24* к магнитной катушке *18*. Обозначение полярности на рис. 31 соответствует разомкнутому контакту *24*. Постоянный ток, протекающий через сопротивление *17* и катушку *18*, создает в удерживающем магните определенный магнитный поток. При правильно выбранной величине конденсатора *21*, легко определяемой экспериментально при замыкании *24*, импульсный разрядный ток конденсатора *21* превосходит ток цепи *17—18* и достаточен, чтобы временно уничтожить намагничивание железа и перемагнитить его. В это мгновение возвратная пружина отбрасывает назад контакт *19* с его якорем.

Восстанавливающийся после разряда конденсатора *21* ток цепи *17—18* снова вызывает намагничивание, но его недостаточно, чтобы снова притянуть якорь с контактом *19*. Момент исчезновения магнитного поля обусловлен электрическими данными емкости *21* и катушки *18* и постоянен, как и интервал времени от включения контакта *24* до исчезновения намагничивания катушки *18*. Время возврата якоря до размыкания контакта *19* также постоянно и обусловлено механической силой пружины и массой якоря с контактом. Благодаря очень малому времени гашения магнитного поля описанная вначале как неуничтожимая область разброса *d* (рис. 28) уничтожается, так как остаточное намагничивание каждый раз исчезает в пренебрежимо малое время и в это мгновение действует только постоянная механическая возвратная сила. Медленно восстанавливающееся поле в цепи *17—18* (рис. 31) застает якорь магнита уже на значительном расстоянии, так что он уже не может более оказывать нарушающее действие. Если теперь используют схему рис. 30 в такой форме, что контакт *15* берет на себя роль контакта *24* (рис. 31), то схема по рис. 30 с равным успехом допускает выключение точно по фазе. Для точных по фазе включения и выключения необходимы два устройства, причем одно из них соответственно рис. 30 включает точно по фазе посредством замыкания контакта *15*, а другое (по рис. 31) выключает точно по фазе посредством замыкания контакта *24*. Оба контакта посредством системы реле *1—14* по рис. 30, примененные дважды, включают и выключают в заданном фазовращателем *5—6* фазовом угле. Многие конструктивные

элементы, например выпрямитель или стабилизатор напряжения для периодического контактирования, могут одновременно применяться для обеих схем.

Выпускаемая аппаратура этого вида показывает, что возможно включение реле на 50 *ква* с разбросом до ±5° по фазе; в то же время выключение соответственно рис. 31 при оптимальной величине конденсатора *21* достигается с разбросом в среднем ±7,5°. Этот результат получен с помощью обычных конструктивных элементов электротехники. Точность управляющей аппаратуры *1—15* (рис. 30), т. е. без относительно инерционной системы реле *18—19,* более высокая и составляет в среднем ±1°.

В качестве периодического контактора оказывается пригодным поляризованное телеграфное реле. Часто можно отказаться от применения отдельной компенсационной токовой обмотки, в которой несимметрично установлен контактный якорек. Регулировка контактора, естественно, должна производиться с большой тщательностью; целесообразно выполнить ее с помощью электронно-лучевого осциллографа по юстировочному шаблону. Так как все контакты контактора проводят ток только во время импульсов включения и выключения, они совершенно не выгорают. После более чем 100 000 включений нельзя установить изменение времени замыкания контактов.

Конденсаторы, питающие магнитные катушки и катушки реле, при одинаковом напряжении заряда различаются по емкости и должны в зависимости от условий иметь запасенную электрическую энергию, бо́льшую, чем работа движения якоря магнита, в то время как конденсатор, необходимый для гашения магнитного поля контактора, должен выбираться более тщательно. Для этого определяют индуктивность L измерением тока I, проходящего по катушке реле:

$$L = \frac{U}{\omega I}.$$

Омическим сопротивлением можно пренебречь. Тогда емкостная энергия гасящего конденсатора должна быть равна индуктивной энергии магнитной катушки

$$\frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} LI^2; \quad C = \frac{LI^2}{U^2}.$$

8. ИСКРОВОЙ РАЗРЯДНИК С ВОЗДУШНЫМ ДУТЬЕМ

Для использования преимуществ очень больших пиков тока и относительно высоких напряжений при очень быстром следовании разрядов (свыше 1 000 в 1 *сек*) Маркс предложил так называемый искровой разрядник с воздушным дутьем. При этом между двумя шарообразными, расположенными друг против друга электродами искрового разрядника постоянно вдувается воздух определенным образом. Практически при конструировании поступают так, чтобы в цилиндр, окружающий систему искровых разрядников, воздух поступал одновременно на оба электрода с высокой скоростью; оба электрода имеют центральные отверстия, через которые газ течет аксиально и удаляется с обеих сторон искрового разрядника. При этом разрядный промежуток между электродами промывается газом и продукты ионизации удаляются продуванием. Благодаря этому дутью каждая следующая искра возникает в одинаковых условиях. Подобным устройством удается осуществить включение с частотой до 50 000 в 1 *сек*. Этот искровой разрядник с воздушным дутьем находит особенно успешное применение в конденсаторных высокочастотных установках; при этом каждый конденсаторный разряд возбуждает колебательный контур, который затухает и при этом нагревает деталь. Как только затухает энергия предыдущей искры, сразу же возникает потребность в следующем импульсе. Если подобным аппаратом производят, например, с частотой 300 *кгц* нагрев деталей и колебательный контур имеет декремент 0,1, то можно рассчитывать на достаточное «голодание» колебательного контура в интервале 1/30 000 *сек*; таким образом, желательна частота следования искр 30 000 в 1 *сек*. Если каждый разряд имеет энергию только 1 *вт·сек*, то в сумме выходная мощность все-таки составит 30 *квт*. В особом варианте этой конструкции, с центральным поджигающим электродом, можно управлять включением разрядов и при этом получить в свое распоряжение очень прочные и легко поддерживаемые в исправности конструктивные элементы для практически любой частоты включения.

Относительно амплитуды тока действительно все сказанное в предыдущем разделе: несколько тысяч ампер могут периодически включаться на несколько микросе-

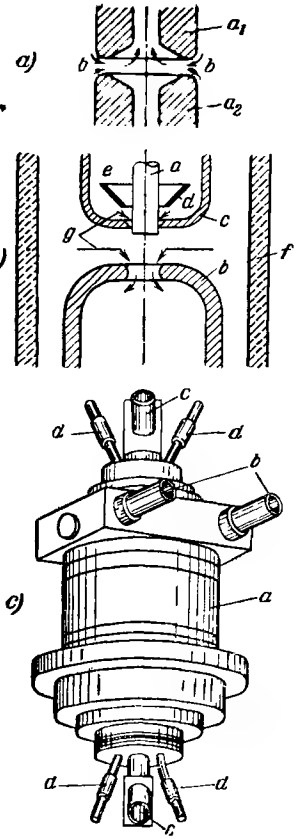


Рис. 33. Искровой разрядник Маркса с воздушным дутьем.

а) — простейшая схема электродов: a_1 и a_2 — электроды; *b* — поток сжатого воздуха; *b*) — управляемый импульсный искровой разрядник: *а* — стержневой электрод; *b* — зонтообразный противоположный электрод; *с* — поджигающий электрод; *d* — электрод предварительной ионизации; *е* — область высокого давления поджигающего воздушного потока; *f* — цилиндр высокого давления; *g* — поток сжатого воздуха; *с*) — внешний вид искрового разрядника с воздушным дутьем: *а* — цилиндр высокого давления с расположенными внутри электродами; *b* — ввод сжатого воздуха; *с* — выход сжатого воздуха; *d* — подвод охлаждающей воды.

кунд. Относительно импульсов напряжения нужно обратить внимание на то, чтобы успел образоваться ионный канал, предшествующий разряду. Предел величины такого искрового разрядника с воздушным дутьем достигается при расстоянии между шарами около 2 *см* и напряжении на конденсаторе около 60 *кв*. Практические конструкции работают с напряжением на конденсаторе 10—15 *кв* и частотой включения до 10 000 в 1 *сек*. Они обычны в высокочастотных генераторах с искровыми разрядниками с воздушным дутьем для индукционной закалки [Л. 12]. Конденсатор при этом заряжается просто от переменного напряжения, так как для процесса нагрева не имеет значение, какую полярность имеет разряд. Конструкция искрового разрядника с воздушным дутьем показана на рис. 33,*а—с*; управляемый искровой разрядник с воздушным дутьем, имеющий поджигающий электрод, представлен на рис. 34. Масштаб приблизительно 1 : 2 по сравнению с практически применяемыми моделями. Пока имеется в распоряжении сжатый воздух, искровой разрядник с воздушным дутьем может быть избран как средство периодического включения импульсов средней энергии при высокой частоте следования для длительной эксплуатации. Эконо-

мичным в эксплуатации при обычном на промышленных предприятиях давлении воздуха 6 *ат* является вдувание воздуха со средним давлением до 0,5—0,8 *ат* и расходом его около 10 *м³/мин*.

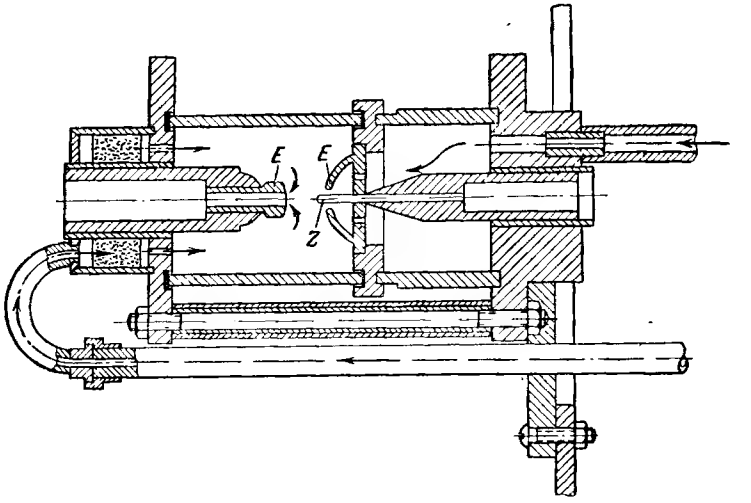


Рис. 34. Импульсная лампа с воздушным дутьем.
E — главные электроды; *Z* — поджигающий электрод.

9. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Для включения и выключения конденсаторных разрядных контуров, имеющих включающие органы, употребляющие сжатый воздух, например искровые разрядники с воздушным дутьем, можно также использовать сжатый воздух для включения и переключения. В качестве примера особенно пригодны описанные в предыдущем параграфе искровые разрядники с воздушным дутьем упрощенно показанные на схеме рис. 35,*а*. Здесь импульсный конденсатор *2*, периодически заряжаемый от высоковольтного трансформатора *1*, всякий раз после достижения напряжения пробоя искрового разрядника *3* разряжается через индуктивность *4* на рабочий контур *5* и там возбуждает затухающие высокочастотные колебания. Искровой разрядник с воздушным дутьем *3* продувается после каждой искры, чтобы

получить возможно более высокую частоту следования разрядов.

При высокочастотной мощности, начиная с 20 *квт*, периодические включения и выключения установки для

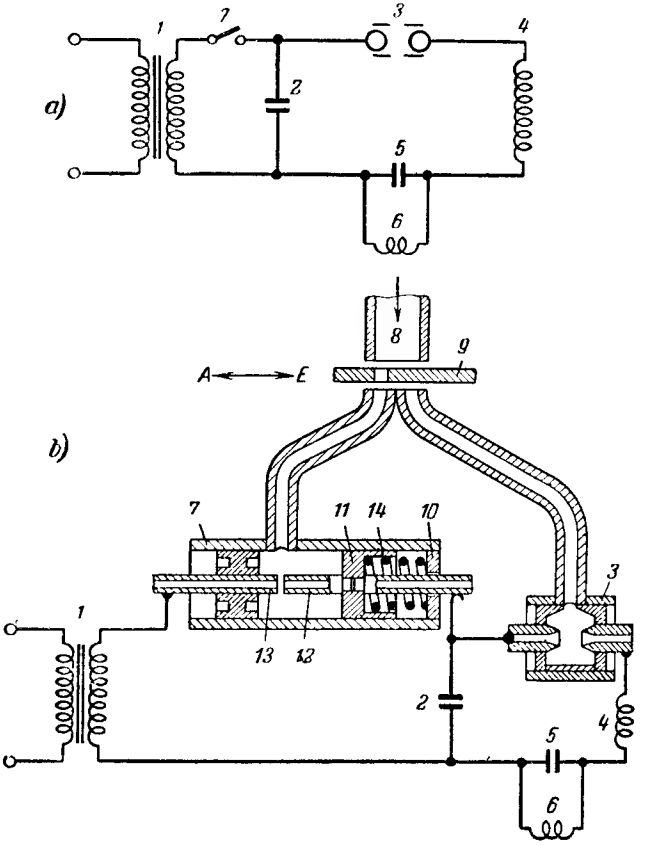


Рис. 35. Пневматический включатель искрового разрядника с воздушным дутьем.

а — принципиальная схема; *б* — пример выполнения.

индукционной закалки представляют известные трудности. Требуются большие контакторы с первичной стороны трансформатора, у которых сильно выгорают контакты. Применение для указанных выше целей выключателей высокого напряжения вместо контакта 7

(рис. 35,*а*) в форме обычных до настоящего времени водяных включателей слишком дорого. Поэтому в соответствии с рис. 35,*б* контакт *7* заменяется переключающим устройством, которое подводит воздушное дутье к искровому разряднику или подобной ему выключающей камере, производящей под действием давления воздуха размыкание цепи высокого напряжения посредством подвижных электродов. Эта выключающая камера работает следующим образом: выключатель расположен в цилиндрической трубе *10*, в которой скользит поршень *11*, несущий электрод *12*, прижимаемый пружиной *14* к электроду *13*. Прохождение тока от *13* к *12*, таким образом, гарантировано. Если впустить сжатый воздух в цилиндр *10*, то он сдвинет поршень *11* вправо, электроды *12* и *13* разомкнутся и между ними возникнет дуга высокого напряжения. Сжатый воздух может выходить наружу через отверстия в электродах *12* и *13* концентрично с дугой, благодаря чему электроды охлаждаются и дуга гаснет при очередном прохождении тока через нуль. Этим производится выключение установки. Управление установкой при этом осуществляется задвижкой *9*. В положении задвижки *А* сжатый воздух поступает только в цилиндр *10* и выключает установку. Если задвижку передвинуть в положение *Е*, то сжатый воздух идет только в искровой разрядник *3*, в выключателе *7* исчезает давление, электроды замыкаются и включается установка. Действием задвижки *9* удобно управлять с помощью электромагнита. Одновременно используют преимущество этой конструкции, чтобы свести к минимуму обгорание электродов в искровом разряднике с воздушным дутьем, хотя температура электродов и не опускается ниже 200° С. Если при выключенном устройстве еще протекает сжатый воздух через искровой разрядник *3*, то его электроды очень быстро охлаждаются и при новом включении нужно всякий раз создавать эту рабочую температуру как предпосылку стабильной работы. Однако при конструкции соответствующей рис. 35,*б*, искровой разрядник *3* получает сжатый воздух только тогда, когда разрядник включен.

Принимая во внимание то, что время горения дуги между электродами *12* и *13* очень незначительно, выбирают очень малые размеры для выключателя *7*, так как

здесь никогда не возникает тока короткого замыкания, а лишь вторичный ток, определяемый размерами установки, порядка 1—10 *а*. Стоимость изготовления такого выключателя удается снизить настолько, что она составляет только незначительную часть стоимости обычно требующегося большого контактора, включающего низкое напряжение.

10. ИСКРОГАСЯЩИЙ РАЗРЯДНИК

Искрогасящий разрядник является, пожалуй, старейшим устройством для быстрого периодического включения разрядов конденсаторов. Вначале он был задуман для радиопередатчиков, чтобы снабжать антенну очень быстро следующими один за другим импульсами энергии, которые затухают в колебательном контуре. Стало возможным применением так называемого искрогасящего разрядника довести мощность передающей антенны до нескольких киловатт и соответственно повысить радиус действия. При этом используется эффект, проявляющийся в искровых разрядниках с чрезвычайно малым пробивным промежутком и незначительным объемом плазмы между электродами; очень скоро после начала разряда термическое охлаждение приходит к равновесию с мощностью ионизации, которая требуется для поддержания хорошей проводимости. Как только из-за разряда конденсатора снижается ионизирующая мощность, охлаждение поступающих на электроды ионов и диссоциированных атомов перевешивает поступление энергии от колебательного контура и наступает обрыв разряда. Чтобы получить достаточно высокое включающее напряжение, размещают одну за другой большое число изолированных плоских шайб искрогасящего разрядника с расстоянием 50—200 *мк* между ними. На рис. 36 показана схема с гасящим искровым разрядником в генераторе световых вспышек для фотографических целей.

Принимают среднее зажигающее и гасящее напряжение на одну шайбу с интервалом около 600 и 300 *в*; таким образом, например, при 20 шайбах могут возникнуть пробой при 12 *кв* и гашение разрядника при 6 *кв*. Шайбы разделяют друг от друга слюдяными кольцами. Особенно распространены подобные устройства с плоскопараллельными вольфрамовыми шайбами и

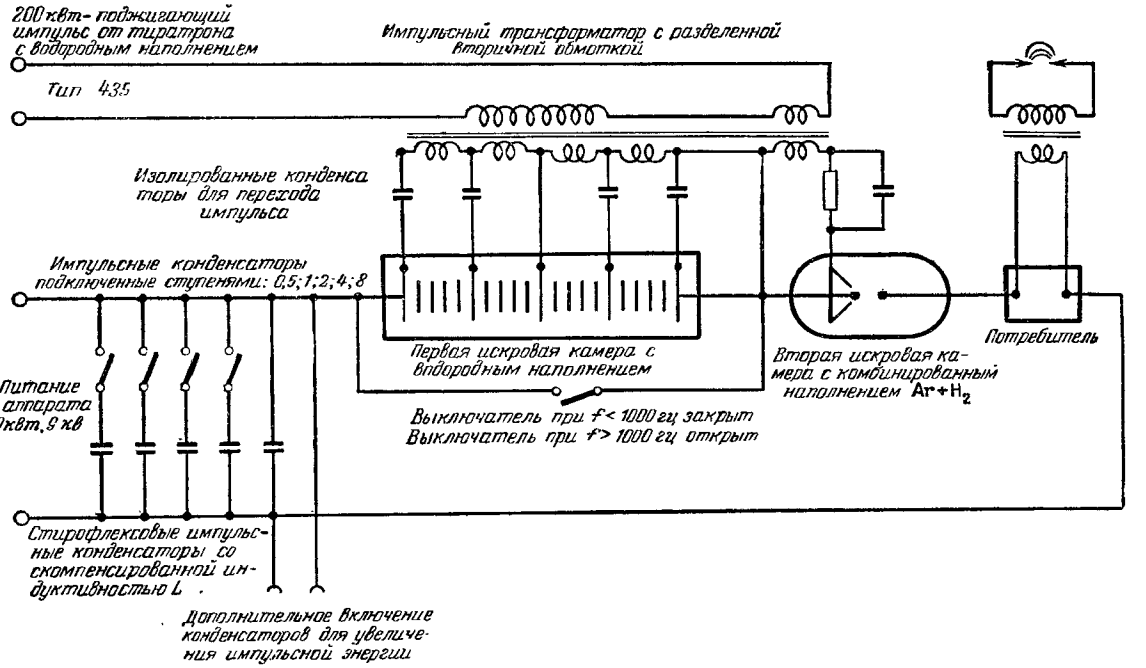


Рис. 36. Схема импульсного включателя для частоты следования импульсов от 0 до 50 000 импульсов в 1 *сек* или 50 000 *сек*$^{-1}$ с искрогасящим разрядником, управляющим импульсным зажиганием (L=0,02 *мкгн*).

Пример. Импульсный трансформатор с вторичным напряжением 50 *кв* для получения серии искр, перемещающихся потоком воздуха и служащих для фотографирования быстропротекающих процессов.

очень маленькими конденсаторами величиной порядка 200 *пф* при рабочем напряжении зарядки 10 *кв*; удается возбуждать импульсы с частотой ~30 *Мгц* при выходной мощности примерно 200—500 *вт*. Соответствующие генераторы высокой частоты за отсутствием мощных и долговечных радиоламп применяются в ультракоротковолновой терапии. На рис. 37 приведена схема

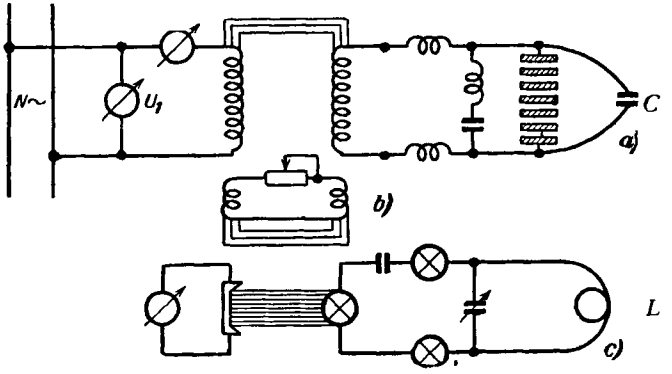


Рис. 37.

а — контур высокочастотного генератора с искрогасящим разрядником; *b* — передающий и развязывающий контур (промежуточный контур); *с* — внешний потребитель, здесь — фотоэлектрический ваттметр

имеющегося в продаже ультракоротковолнового терапевтического аппарата, работающего с таким искрогасящим разрядником. До сегодняшнего дня по этой схеме, модифицированной для более низких частот около 1 *Мгц*, работают электрохирургические аппараты. Благодаря нечувствительности к колебаниям сетевого напряжения ($N \sim U$) и отсутствию времени разогрева вольфрамовый искрогасящий разрядник используют для возбуждения колебательного контура

Частота включений при маломощном разряде этого вида достигает 1 млн. за 1 *сек*. Если искрогасящий разрядник изготовлен из меди и обеспечивает чистую металлическую поверхность эксплуатацией в восстановительной атмосфере водорода, то можно повысить мощность, так как медь чрезвычайно хорошо проводит тепло, а водород в качестве наполняющего газа дает очень высокую подвижность ионов, что еще повышает частоту искровых разрядов. Медным искрогасящим разрядни-

ком, состоящим из 25 шайб, можно такими быстро друг за другом следующими разрядами конденсаторов получить длительную мощность на потребителе, будет ли он омическим сопротивлением или колебательным контуром, до 2 000 *вт*. Эксплуатация упрощается, если весь искрогасящий разрядник работает вместо водорода в парах спирта. Надежным является размещение искрогасящего разрядника в герметическом металлическом корпусе. Перед герметизацией на дно сосуда наливают тонкий слой кипящего спирта. Образующиеся пары вытесняют воздух и устраняют необходимость предварительного эвакуирования сосуда. Оказывается, что атомы углерода в ионизированном газе, образовавшемся из спирта, практически не оказывают нарушающего влияния, так как механизм проводимости создают только быстро движущиеся водородные ионы. При хорошем уплотнении сосуда этот простой способ эксплуатации упрощает обслуживание, так как спиртовой резервуар в течение очень большого времени создает достаточно газа и во время перерывов в работе снова образуется спирт конденсацией паров без повышения давления.

Автору удалось при конструировании новых высокочастотных киноаппаратов создать управляемый искрогасящий разрядник. Представляется бессмысленным стремление управлять механизмом искрогасящего разрядника, у которого быстрое затухание определяется рассеянием энергии на электродах. Но так как искрогасящий разряд представляет собой очень быстро работающее устройство включения, следует проверить мысль, нельзя ли так же точно зажигать и искрогасящий разрядник. Для этого на большое число электродов (при совместной работе 20 медных шайб достаточно 3—4 поджигающих электродов) должны подводиться очень мощные поджигающие импульсы. Применяют импульсную мощность до 200 *квт* при длительности импульса около 0,2 *мксек* и раздельное питание каждых 3—4 поджигающих электродов отдельной обмоткой импульсного трансформатора. Эта «инжекция энергии» достаточна для надежного возбуждения последующего главного разряда без опасения самостоятельного пробоя разрядной системы в интервале между поджиганиями.

В рамках допустимого нагрева всей системы, соответствующего максимальной длительной мощности

100 *вт*, можно пропустить от 10^4 до 10^5 искр, а при хорошем к. п. д. даже 10^6 искр в 1 *сек*, с точностью возникновения до 0,1—0,2 *мксек*. Управление разрядами производится мощным водородным тиратроном, которым в свою очередь управляет мультивибратор. Возможны также модуляции по времени, например модуляция интервалов между импульсами при программной передаче речи.

Такая система передачи, которая модулируется управляемым водородным искрогасящим разрядником, дает на приемной стороне при частотной модуляции ничтожное дополнительное искажение, определяемое клирфактором, по сравнению с передачей по проводам. Незначительность искажения существенно обусловлена тем, что ограничены все без исключения появляющиеся в зависимости от обстоятельств моментальные нарушения отдельных импульсов, которые при высокой основной частоте, например 30 000 за 1 *сек*, лежат ниже прочих шумовых и других мешающих явлений и поэтому не имеют значения. Поэтому управляемый водородный искрогасящий разрядник чрезвычайно надежное включающее устройство для разрядов конденсаторов с зарядным напряжением примерно от 6 000 до 12 000 *в* с пиками тока от 500 до 5 000 *а* при частоте следования импульсов от 0 до 100 000 в 1 *сек* причем при соответствующей средней мощности возможна длительная работа. Без ограничения мощности в границах допустимого нагрева возможна серия импульсных разрядов с мощностью отдельного импульса 1—50 *Мвт* при длительности отдельного импульса менее 1 *мксек* и средней мощности потребителя до 50 *квт*. Потребители с сопротивлением не свыше 0,5 *ом* могут снабжаться импульсами энергии при к. п. д. около 50%. При сопротивлении 1—5 *ом* можно обеспечить к. п. д. порядка 70%, однако вряд ли можно получить менее 10% потерь в искрогасящем разряднике. С другой стороны, конструктивные возможности наружного охлаждения и свойства материала окружающего цилиндра из кварцевого или тугоплавкого стекла определяют границу мощности в несколько сотен ватт и при длительной работе можно подводить к потребителю только несколько тысяч ватт. Большая масса металла, которая может составлять для всей электронной системы, например, 1 *кг*, представляет собой тер-

мический резервуар. Итак, можно конструктивно обеспечить серию импульсных разрядов с заданной общей энергией. 1 *кг* меди, нагретый на 1° С, имеет теплосодержание 90 *кал*, т. е. при допустимом нагреве на 150° С система содержит 13 500 *кал*, или в электрических единицах около 50 000 *вт·сек*. При к. п. д. 70% можно передать в серии разрядов общую энергию до 120 000 *вт·сек* независимо от частоты; таким образом, например, при 10 000 разрядов за 1 *сек* и мощности разряда 1 *вт·сек* допустима длительность работы 12 *сек*. При более длительной работе происходит дополнительное охлаждение излучением через стеклянный или кварцевый цилиндр около 250 *вт·сек/сек* при температуре системы 200° С.

С. ПРОВОДА

1. ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В каждом случае, когда конденсатор разряжается через включающее устройство, как изложено в разд. «В», однократно или периодически на потребителя, электрическая энергия разряда должна пройти по соединительным проводам. Этим проводам уделяют, как правило, недостаточно внимания. Для каждого провода существенным является характеризующее его волновое сопротивление Z.

Волновое сопротивление провода, хотя и зависит от частоты по величине и фазе, но для частоты свыше 20 *кгц* становится постоянным и чисто омическим и не зависит от длины провода, если провод гомогенный. Вообще для всех частот волновое сопротивление

$$Z = \sqrt{\text{продольное сопротивление} \times \text{поперечное сопротивление}};$$

в другом написании

$$Z = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}},$$

где R — омическое сопротивление на единицу длины провода;
ω — круговая частота; $\omega = 2\pi f$;
L — индуктивность единицы длины линии;
C — емкость единицы длины линии;

G — проводимость утечки (поперечное сопротивление) единицы длины между проводами.

По анализу Фурье импульсы разрядного тока имеют также составляющие с частотой ниже 20 *кгц*, но они настолько малы по своей амплитуде, что ими можно пренебречь и практически при всех импульсных разрядах волновое сопротивление можно считать чисто активным Так как для высокой частоты

$$\omega L \gg R \text{ и } \omega C \gg G,$$

то при высокой частоте волновое сопротивление

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Имеются две совершенно различные задачи для соединительного провода: добиваться либо более высокого к. п. д., либо более высокой передаваемой мощности, т. е. доставить максимум мощности потребителю.

Первое требуется, если трансформатором или подобным устройством далее преобразуют импульс энергии. В этом случае можно сказать, что волновое сопротивление, если соединительный провод мал и короток, должно быть существенно ниже, чем сопротивление потребителя.

Волновое сопротивление представляет собой как бы «горлышко бутылки», через которое импульс значительной энергии не может поступить к потребителю, так как при достаточной силе тока он не может пройти из-за волнового сопротивления. Если волновое сопротивление существенно меньше сопротивления потребителя, то проблемы «горлышка бутылки» не возникает. Зато нужно считаться с частичным отражением энергии в конце провода, что создает наложение колебаний в виде стоячих волн в проводе. Но чисто энергетически волновое сопротивление не имеет очень большого значения.

В другом случае, часто встречающемся в импульсной технике, желателен максимум мощности на конце провода у потребителя. В этом случае нужно в противоположность сильноточной технике обращать внимание не на более высокий к. п. д., а на более высокую переда-

ваемую мощность, что для провода без потерь с максимальным к. п. д. 50% означает

$$R_i = Z = R_a.$$

Правильное соотношение достигается, если внутреннее сопротивление передатчика R_i равно кажущемуся сопротивлению присоединительных проводов Z (однако с обратным знаком фазового угла сопротивления присоединения). Далее, сопротивление нагрузки на конце провода R_a должно быть равно Z. Таким образом, наиболее благоприятные условия создаются в том случае, если внутреннее сопротивление передатчика равно волновому сопротивлению провода, равно сопротивлению нагрузки. Если сопротивление нагрузки отличается от Z, то в проводе возникают стоячие волны, из-за чего вследствие неравномерной и в среднем повышенной загрузки провода током, так же как и потерь на излучение, повышается затухание и передаваемая мощность уменьшается. Все это, однако, играет заметную роль лишь при значительной ошибке в согласовании. Далее будут рассмотрены более подробно характерные примеры проводки в разрядных контурах.

2. ВОЗДУШНЫЕ ПРОВОДА С БОЛЬШИМ РАДИУСОМ ДЛЯ ВЫСОКОГО И НАИВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЙ

Воздушные провода (под это понятие подходят также короткие провода в закрытом помещении между разрядными контурами и потребителями, выполняемые подобно воздушной проводке) имеют в среднем по отношению к земле волновое сопротивление 300—600 *ом*. Если потребитель высокоомный, например трансформатор, первичная обмотка которого, получающая импульс энергии, имеет достаточно большое сопротивление, то передача импульса энергии по таким проводам не является проблемой. Следует только уделить внимание тому, чтобы сделать достаточно большим радиус проводов и тем устранить потери на корону и возможность пробоя и перекрытия проводов. Воздушные провода этого рода обычно предусматривают в лабораториях для разрядных цепей при напряжении на конденсаторах более 50 *кв*. При этом трудно передавать соответствующие напряжения другими формами проводов, например

концентрическими кабелями. Однако если на конце такого воздушного провода у потребителя принудительно создают искровой пробой наложением волны, имеющей по стандарту VDE (Общества немецких электротехников) время возрастания 1 *мксек* и время спада 50 *мксек*, то этот искровой пробой не представляет собой потребитель, равный волновому сопротивлению. В отличие от него искровое сопротивление имеет только несколько ом. В результате в отрезке провода между конденсаторной батареей и потребителем возникают стоячие волны. После того как сработал механизм включения, возникает прямая связь провода с питающей конденсаторной батареей и возникают колебания с различной частотой, образуемые наложением высших гармоник, и волновые пакеты перемещаются от конденсаторной батареи к потребителю и обратно. Осциллограммы пробоя на потребителе показывают поэтому в различных лабораториях различные картины в месте пробоя, обусловленные тем, что за время немногих микросекунд между началом пробоя и затуханием высокой частоты, возбужденной в проводе, появляются сильные колебания. В проводе длиной, например, 30 *м* можно наблюдать частоту 5 *Мгц* как основную частоту, т. е. полуволну в 10^{-7} *сек*, что может влиять на механизм разряда максимумом и минимумом этой модуляции. Поэтому можно рекомендовать при количественных измерениях явлений пробоя соединять конденсаторы вместе с включающим устройством (см. разд. В) с потребителем или испытываемым объектом посредством чрезвычайно коротких проводов так, чтобы образующиеся в проводе волны имели очень высокую частоту от нескольких десятков до 100 *Мгц*, и больше не играли никакой роли при измерении объекта, так как они вследствие своего естественного затухания слишком быстро исчезают, чтобы вмешиваться в механизм более продолжительного искрового разряда.

3. КОАКСИАЛЬНЫЙ ПРОВОД

Коаксиальный провод — это кабель, имеющий наружный, чаще всего связанный с массой, подобный шлангу, покрывающий провод, в котором концентрично расположен внутренний провод, тщательно изолированный от внешнего изоляционной массой с низким высо-

кочастотным углом потерь. По нему импульс энергии передается массе. Концентрический кабель изготавливается на рабочее напряжение примерно до 50 $кв_{действ}$ и напряжения пробоя порядка 250 *кв*, причем концентрический внутренний провод допускает длительный ток в несколько ампер.

Соединительный кабель, обычный в высокочастотной антенной технике, без всяких изменений можно применять в импульсном разрядном контуре. Волновое сопротивление его лежит между 30 и 100 *ом*. Действительно сказанное выше для воздушных проводов, т. е. если волновое сопротивление кабеля намного ниже, чем сопротивление потребителя, кабель не представляет собой «бутылочное горло» и импульс может беспрепятственно достичь потребителя. Примиряются также с тем, что при недостаточном согласовании волнового сопротивления кабеля с сопротивлением потребителя на кабеле образуются стоячие волны, которые в случае осциллографического измерения искрового пробоя или другого зависящего от времени сопротивления ведут к неправильной регистрации на осциллографе начала явления, но накладываются на картину разряда только в первые моменты. При этом также стремятся к тому, чтобы кабель был по возможности не длиннее 5 *м* между конденсаторной батареей и потребителем. Так как скорость распространения волны в кабеле равна только половине скорости света, 5 *м* коаксиального кабеля соответствуют 10 *м* воздушных проводов и основная волна, которая образуется на таком отрезке кабеля, имеет соответствующую этому частоту около 15 *Мгц*. При быстро протекающей осциллограмме искры в области напряжений до 30 *кв* эта частота колебаний уже может создать помехи. Однако за $(1 \div 3) \cdot 10^{-7}$ *сек* она настолько значительно затухает, что картина главного разряда мало искажается. Во всех случаях, когда внешним потребителем является искровой разряд, невозможно достичь максимального согласования между конденсаторной батареей и искрой, так как сопротивление искры чрезвычайно быстро изменяется во времени и вследствие своей физической структуры не дает возможности говорить о согласовании. Энергетическому согласованию доступно только среднее значение сопротивления искры. Особый случай представляет диэлектрическая сушка кабеля по-

средством стоячих волн. Этот случай будет здесь рассмотрен, так как сам провод служит потребителем энергии. Бумага, применяемая для изоляции кабеля, как известно, очень гигроскопична. В сухом состоянии содержание в ней влаги зависит от относительной влажности воздуха во время обработки и может составлять до 10% веса бумаги. Поглощенная вода не находится в системе бумага — вода в своей первоначальной форме, а возни-

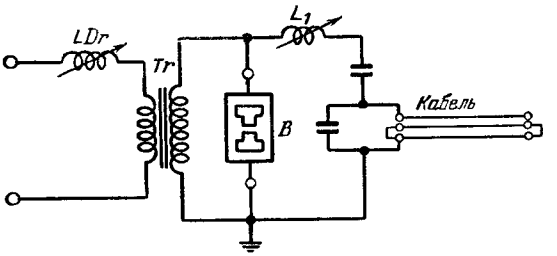


Рис. 38. Схема конденсаторного устройства с искровым разрядником с воздушным дутьем для сушки кабелей по Бринкманну.

Tr - трансформатор; *LDr* - добавочная реактивная катушка; L_1 - индуктивность; *B* - искровой разрядник с воздушным дутьем.

кает «интермицеллярное» распределение, при котором вода связана на граничных поверхностях целлюлозы и заполняет капиллярные объемы между волокнами. Это обстоятельство проявляется также в уменьшении давления паров по сравнению с несвязанной водой, которое особенно значительно при малом содержании воды и очень затрудняет полное высушивание. Для изготовления высококачественного кабеля с низкими диэлектрическими потерями нужно перед пропиткой кабеля изолирующим маслом удалить влагу из кабельной бумаги. Сушка бумажной изоляции обычно осуществляется длительным нагревом свернутого в бухту кабеля в вакуумируемом котле или нагревом проводников кабеля теплом проходящего электрического тока. Однако можно значительно лучше осушить кабель, если создавать необходимое для этого тепло непосредственно в диэлектрике. По предложению Бринкманна и Маркса для этого служит схема рис. 38 и кабель включают вместо обычного при такой схеме колебательного кон-

тура для индукционного нагрева [Л. 13]. При этом получают в паузах между двумя пробоями в искровом разряднике с воздушным дутьем колебания с отражением от конца кабеля. Вследствие сильного затухания этого колебания ширина полосы пропускания значительна и нельзя зафиксировать определенную независимую от частоты картину явления, например, нагрева в местах пучностей волны. Вследствие широкой полосы частот по большей части наступает равномерный процесс диэлектрического нагрева в подключенном осушаемом кабеле. Колебания, которые используют при этом, имеют частоту порядка 100—600 *кгц*. Высокое напряжение подводится через разработанный для этой цели специальный ввод, ибо, как и прежде, удаление влаги производится вакуумированием. Сильно затухающие колебания протекают обычно в кабеле как бегущие волны с определенной скоростью распространения. На открытом конце кабеля волны отражаются и складываются с набегающими волнами напряжения в результирующее напряжение, причем отраженная волна при ее подходе к началу кабеля так ослабляется, что, как упоминалось выше, перенапряжения исключены. При этом важно обеспечить очень равномерную работу искрового разрядника, так как пробой при повышенном напряжении может привести к тому, что диэлектрик будет подвергнут недопустимому перенапряжению. Следовательно, целесообразно использовать безынерционную конструкцию искрового разрядника.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

У всех соединительных проводов имеет существенное значение их индуктивность. Для упрощения принято, что как потребитель, так и провода обладают пренебрежимо малым сопротивлением. В этом случае энергия конденсатора $\frac{1}{2} CU^2$ после действия включающего устройства превращается в магнитную энергию $\frac{1}{2} LI^2$.

Возникающий при этом максимальный ток

$$I = \sqrt{\frac{CU^2}{L}}$$

рассчитывается, как в следующем примере.

При емкости конденсатора 10 *мкф*, напряжении зарядки 30 *кв* и 10 *м* коаксиального кабеля с линейной индуктивностью 0,5 *мкгн/м*, т. е. с общей индуктивностью 5 *мкгн*, максимальный ток

$$I = 4{,}5 \cdot 10^4 = 45\,000 \ a.$$

Так как провода с противоположно направленными токами отталкиваются, наружная оболочка кабеля стремится удалиться от внутреннего провода. Это может привести к растрескиванию кабеля и при известных обстоятельствах к полному разрыву. При этом может легко наступить механическое нарушение изоляции со спонтанным пробоем в поврежденном месте, что еще больше снижает индуктивность. При этом усилия еще больше возрастают. Нужно представить себе, что в случае полного короткого замыкания на конце кабеля энергия конденсатора, составляющая, как дано в расчетном примере,

$$\frac{1}{2} CU^2 = 4{,}5 \ кдж,$$

механически эквивалентна около 450 *кГ · м*. Если на кабель падает груз весом 450 *кг* с высоты 1 *м*, то можно с уверенностью предположить, что кабель будет разрушен, раздавлен или расплющен. Полезно чаще представлять себе это, чтобы чувствовать возможные разрушения в случае, если непредвиденный пробой освободит механическую энергию.

5. ЛЕНТОЧНЫЙ ПРОВОД

Ленточный провод представляет собой особую форму коаксиального кабеля, у которого волновое сопротивление существенно снижено. Из известного соотношения

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

видно, что волновое сопротивление снижается с возрастанием C и уменьшением L. Таким образом, приходят к тому, чтобы сделать поверхности прямого и обратного проводов возможно бо́льшими, а расстояние между ними — минимальным. Отсюда получаются две наиболее употребительные формы исполнения.

Одна состоит из двух или трех металлических полос или лент, которые спрессованы с изоляционной прокладкой и притянуты болтами к толстой изоляционной плите или полосе. При этом болты воспринимают отталкивающую силу, возникающую при пропускании тока. Эта форма ленточного провода легко допускает механизированное изготовление.

В более пригодной для заводского изготовления форме используют две концентрично одна в другой расположенные трубы с вложенным между ними диэлектриком. Трубы могут в соответствии с поперечным сечением воспринимать радиально действующие равномерно распределенные силы.

Представим себе две медные полосы толщиной 1 *мм* и шириной 100 *мм*, которые спрессованы на диэлектрике толщиной 1 *мм*, например на твердой бумаге. Тогда при диэлектрической постоянной около 2,5 образуется емкость около 2,5 *пф* на 1 $см^2$ и при длине провода 100 *см* соответственно поверхности одной стороны провода 1 000 $см^2$ получим 2 500 *пф*.

У трехполосового провода, у которого две полосы заземлены и полоса, лежащая между ними, подводит высокое напряжение, емкость составляет уже 5 000 *пф/м*. Индуктивность при этой форме изготовления ленточного провода составляет 0,01 *мкгн/м*. При этом волновое сопротивление

$$Z = \sqrt{\frac{10^{-8}}{5 \cdot 10^{-9}}} = 1{,}4 \text{ ом}.$$

Мы видим, что волновое сопротивление величиной в несколько ом и даже ниже реализуется соответствующим параллельным включением подобной системы ленточных проводов. Искровое сопротивление имеет величину порядка 0,6—2 *ом* (среднее значение за время полного искрового разряда); можно такими ленточными проводами питать искровой разрядник, у которого искра является потребителем энергии без ущерба для к. п. д., на расстоянии нескольких метров от питающей батареи конденсаторов. Не возникает «горлышка бутылки» и достигается достаточно полное согласование с волновым сопротивлением. Поэтому находят применение специальные кабели с ленточными проводами. Они изготавливаются на заводах для определенных целей, и нужно

обеспечить достаточное давление по всей длине линии при опрессовке изолирующим материалом, чтобы полосы действительно плотно прилегали друг к другу. Так как в случае искры в качестве внешнего потребителя энергии, запасенной в конденсаторе, при величине сопротивления около 1 *ом* возникают чрезвычайно высокие пики тока, например при напряжении на конденсаторе 10 000 *в* — токи порядка 10 *ка*, то возникающие при эксплуатации динамические силы отталкивания между листами велики (10—100 *кГ* на 10 *см* длины полосы) и опорные изоляционные пластины, охватывающие и сжимающие полосовой кабель, выполняются часто с фасонным профилем, чтобы они могли противостоять толчкам отталкивающих сил. При «мягких» ленточных кабелях каждый разряд, сопровождаемый толчком отталкивающей силы, производит в полосовом проводе механическую работу движением или деформацией провода, которая означает потерю энергии. Если мы имеем, например, энергию разряда небольшого конденсатора емкостью 1 *мкф*, заряженного до напряжения 10 *кв*, равную 50 *вт · сек*, или 5 *кГ · м*, и в токопроводе возникает сила 100 *кГ* между проводами при упругости 1 *см*/100 *кГ*, получаем 100 *кГ · см* = 1 *кГ · м* механических потерь из-за движения провода, т. е. потери до 20% первоначальной энергии разряда. Поэтому нужно обращать внимание на то, чтобы гибкие соединения любого вида в разрядной системе, являющейся низкоомным внешним сопротивлением (несколько ом), были устранены, так как каждое движение такого гибкого соединительного отрезка означает недопустимые при измерениях потери разрядной энергии на электродинамическую работу. При чисто упругой деформации возникает обратное поступление энергии по кривой, подобной петле гистерезиса. Общая конструкция конденсаторного разрядного контура с такой высокой силой тока проектируется, исходя из статического нагружения; как и в мостостроении, при динамическом развитии усилий может, как и в мостах, произойти разрушение. Возникающая отталкивающая сила между отдельными проводами может подсчитываться по основной формуле электротехники, которая приведена ниже:

$$P = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi r},$$

где P — сила отталкивания между проводами с противоположно направленными токами, *вт·сек/см*;
I — ток в проводе, *а*;
l и r — длина проводов и расстояние между проводами, *м* или *см*.

6. ФОРМЫ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ПРОВОДКИ

Хотя уже представленная выше система ленточной проводки показывает чрезвычайно низкую индуктивность, часто бывает необходимо уменьшить собственную индуктивность геометрических конструкций, например

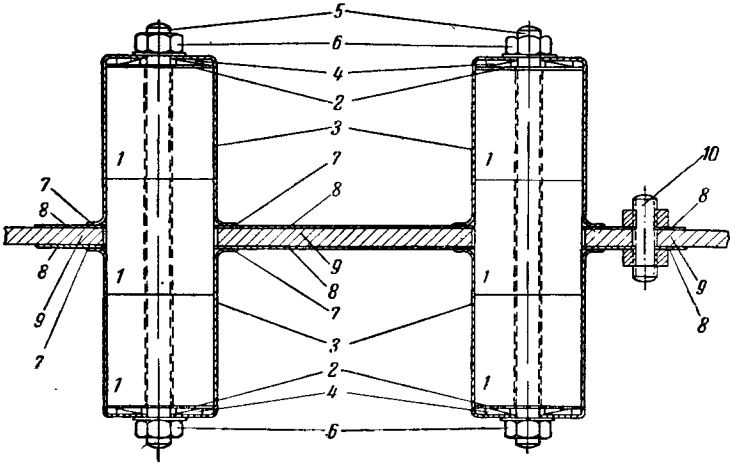


Рис. 39. Поперечное сечение компенсирующего включения отдельных цилиндрических конденсаторов (параллельное включение). (Цифры см. в тексте.)

колонки, состоящей из конденсаторных элементов. Известно, что индуктивность проводов можно свести почти к нулю так называемой бифилярной обмоткой. Бифилярную обмотку обычно представляют на катушке, где по часовой стрелке и в противоположном направлении намотано одинаковое число витков, чем компенсируется индуктивность. Но тот же принцип сохраняется и для проводов, расположенных в пространстве. Рис. 39 показывает поперечное сечение компенсационного соединения отдельных цилиндрических конденсаторов. Для упрощения здесь показаны только две колонки конден-

саторов. Каждый конденсатор состоит из трех обмоток *1*, напрессованных одна на другую. Емкость, естественно, подключена к торцовым поверхностям *2*. Задача состоит в том, чтобы компенсировать индуктивность этой конструкции. Для этого используют листовой корпус *3*, который прижат к выводам конденсатора *2* через контактные сетки *4*. Обмотки конденсатора намотаны на маленькие изоляционные трубки, через которые проходят болты *5*, которые стягивают гайками *6* все сооружение с компенсирующим наружным корпусом. Затем наружные цилиндрические корпуса связаны фланцами *7* с пластинчатой системой проводов *8*, расположенных на тонкой изоляционной пластине *9*. Обычно соответствующие изолированные болты, как показанный справа на рис. 39, поз. *10*, прочно стягивают листы *8*—*8*, обеспечивая невозможность механической работы. Видно, что можно практически сколь угодно много конденсаторов прикрепить фланцами к таким листам и каждый из них будет при этом бифилярно компенсирован. Таким способом можно собирать очень большие конденсаторные батареи с малыми потерями, т. е. без индукционных потерь (см. также разд. А3), и снимать полную энергию разряда с любого места системы пластинчатых проводов. Общую индуктивность батареи в несколько микрофарад при нескольких десятках киловольт напряжения можно получить порядка 0,03 *мкгн*. С подобной техникой работают сегодня с искровыми разрядами для получения наивысших температур (эксперименты Курчатова [Л. 2]). Если в низкоомном искровом контуре должны быть получены токи от 10^5 до $2 \cdot 10^6$ *а* при напряжении 10—40 *кв* с амплитудой мощности порядка 40 млн. *квт*, нужно прежде всего обратить внимание на то, чтобы уменьшить любое индуктивное накопление энергии в разрядном контуре. К конструктивной форме самого конденсатора не относятся особенно критично, так как в относительно малоценных бумажных конденсаторах, обмотки которых прочно спрессованы на торцах, легко достижима собственная индуктивность каждого конденсатора порядка 0,25 *мкгн*. Но если включают параллельно несколько сотен таких элементов, что отвечает соответствующему делению индуктивности, то видно, что при возрастающем числе отдельных элементов индуктивность отдельного конденсатора теряет значение

и практически не играет никакой роли, так что в конце концов общая индуктивность определяется связывающей системой проводов. Это позволяет легче осуществлять при проектировании конструкций получение умеренной индуктивности за счет тщательного выполнения и применения высококачественных изолирующих материалов. Создание чрезвычайно круто возрастающего магнитного

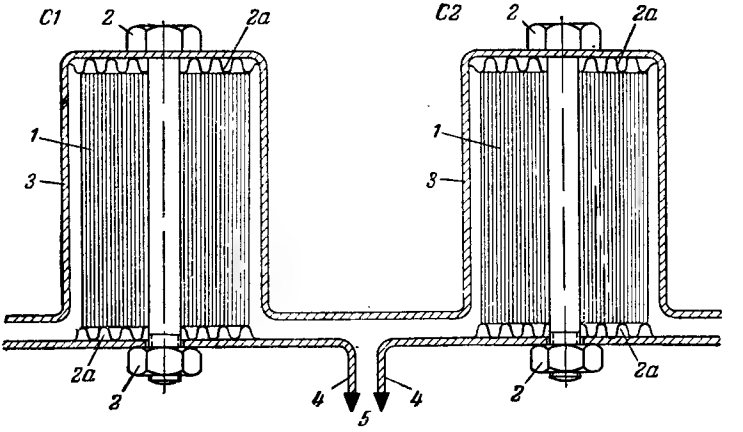


Рис. 40. Безындукционное последовательное включение двух конденсаторов (цепное включение) с «бифилярными» листовыми корпусами *3* и ленточным проводом *4*. (Цифры см. в тексте.)

поля [Л. 14] с очень высокой крутизной возрастания разрядного тока также требует такой же техники включения. Приведем в заключение маленький пример для упражнения. Два цилиндрических конденсатора *C1* и *C2* нужно включить последовательно при одновременном предельном уменьшении их индуктивности с присоединением емкости на систему ленточных проводов. Решение этой задачи показано на рис. 40. Обе обмотки конденсатора представлены на рисунке как поз. *1*; они имеют изолирующие сжимающие болты *2* с контактными шайбами *2а*. Для последовательного соединения используют систему листовых корпусов *3*, которые могут быть изготовлены, например, выдавливанием из тонкого листа металла. Нижние полюсы *2а* конденсаторов связаны с ленточными проводами, на которых расположены оба

полюса *4*, и соответствующая схема доступна для дальнейшего подключения отводящих проводов. При измерении индуктивности на концах *5* можно легко установить, что достижима индуктивность 0,003 — 0,01 *мкгн*. Здесь также многого можно достигнуть тщательно продуманным выполнением.

D. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ КОНДЕНСАТОРОВ В ИМПУЛЬСЫ ТОКА

1. ПРЯМОЙ РАЗРЯД ЧЕРЕЗ ПРОВОДНИК

Задачу получения импульса тока разрядом конденсатора разделяют на два существенно различных вопроса: с одной стороны, к ней можно подойти, добиваясь как можно более высокой крутизны возрастания тока, например 10 000 *а* в 0,1 *мксек*, т. е. 10^{11} *а/сек*, без пиков высокой абсолютной величины. Но, с другой стороны, может быть желательно высокое пиковое значение. Если конденсаторная батарея подключена соединительными проводами через включающее устройство к измерительному устройству, на котором нужно получить крутой импульс тока, то первое ограничение возрастанию тока представляет волновое сопротивление соединительных проводов. Применяя ленточный провод с очень низким волновым сопротивлением, можно получить чрезвычайно большую крутизну возрастания, так как индуктивность таких проводов очень мала.

Если, напротив, нужно создать высокое абсолютное значение тока, то чаще пользуются импульсным трансформатором. Он дает на один-два порядка более высокий пик тока по сравнению с прямым разрядом, так как можно сделать геометрические размеры контура высокого тока очень малыми и соответственно значительно уменьшить возникающее при этом нежелательное магнитное поле. Ниже будут очерчены инженерно-технические границы обоих случаев.

Пик тока, получаемый при прямом разряде конденсатора, зависит только от двух факторов, а именно от энергии конденсатора и индуктивности всей разрядной системы. Наивысшая амплитуда тока достигается в случае, когда статическая энергия конденсатора сразу ди-

намически превращается в ток. В этом случае вместо емкостного накопления энергии наступает чисто индуктивное накопление энергии в системе проводов. Возникают колебания энергии, непрерывно ослабляемые вследствие демпфирования, так что максимальный ток практически появляется через четверть периода возникших колебаний. Каков же достижимый по этому принципу максимальный ток? Предположим, что имеется довольно большая конденсаторная батарея на 20 000 *вт·сек*, которая включается устройством соответственно разд. С, 6 так, что его индуктивность составляет только 0,01 *мкгн* (малое значение, к которому стремятся, но которое едва ли реализуемо). Разрядная система может быть выполнена в виде массивных ленточных проводов и иметь индуктивность 0,01 *мкгн*. Провод, на котором производится эксперимент, также имеет индуктивность 0,01 *мкгн*. Общая индуктивность, таким образом, равна 0,03 *мкгн*.

Итак,

$$I=\sqrt{\frac{CU^2}{L}}=\sqrt{\frac{20\,000}{0{,}03\cdot 10^{-6}}}=800\,000\ a.$$

Этот результат кажется неправдоподобным, и это действительно так. Этот ток значительно ограничен из-за двух факторов.

Вследствие быстрого разряда в проводах проявляется скин-эффект, так что не имеет смысла применять соединительные ленточные провода толщиной более 1 *мм*, так как используется только тонкий слой. Поэтому общее сопротивление при любых конструктивных мероприятиях, вероятно, может иметь минимальное значение порядка 10^{-4} *ом*. Но ток 800 000 *а* на сопротивлении 10^{-4} *ом* дает только омическую потерю напряжения 80 *в*. Второй фактор еще более существенен: при токе 800 000 *а* возникают такие динамические силы между проводами, что практически их совершенно невозможно уравновесить внешней реакцией опор. Таким образом, всегда происходит превращение емкостной энергии при возрастающем токе в динамическую работу деформации. Силы, наблюдаемые при этой нагрузке в ленточном проводе, лежат между 10 и 10^2 *Т*. Их можно считать близкими к пределу текучести материала. Разрядный ленточный провод, которым осуществлено соединение, как и провода внутри кондесаторной батареи, также

приводит вследствие деформации к потерям; таким образом, допускаемый предел импульса тока обусловлен механической конструкцией импульсного конденсатора.

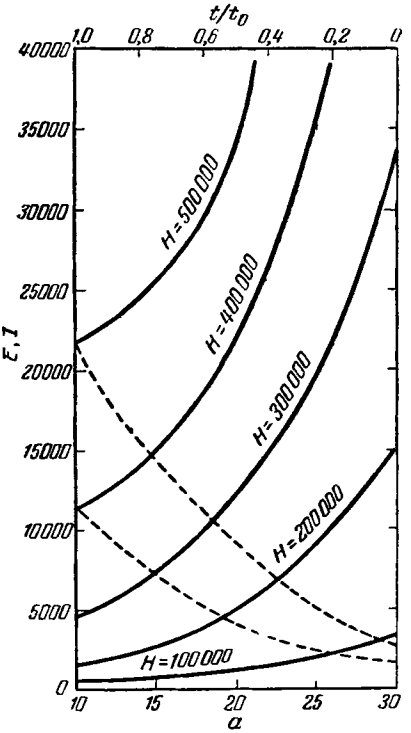


Рис. 41. Зависимость необходимого тока (накопленной энергии) в катушках Гельмгольца от напряженности поля H для различных величин катушек a (сплошная линия) и относительного времени импульса t/t_0 (пунктирная линия).

В работе Фурса и Ваниека [Л. 14] определено предельное значение, которое также зависит от примененного включающего устройства. Поэтому для так называемого «быстрого разряда», протекающего в течение 50—500 *мксек*, целесообразно применять механический выключатель или управляемый искровой разрядник, который расположен в непосредственной близости от магнита или встроен в магнитный индуктор. Обычно такие высокие токи используют для получения магнитных полей; полученные числовые данные приведены на кривых для индукции поля в гауссах[1] (рис. 41). Видно, что очень легко получить величину магнитной индукции 100 000 *гс*, однако при индукции 300 000 *гс* требуется количество джоулей, численно равное диаметру катушки D (5 000—30 000 *дж*). (Так как в международной терминологии обычным является понятие «гаусс», оно здесь сохранено.)

[1] Здесь в качестве единицы измерения использован гаусс, так как он имеет международное употребление и применяется авторами [Л. 14].

Учитывая механическую деформацию конденсаторов и системы проводов может быть достигнута максимальная амплитуда тока порядка 300 000 *а* в прямом разряде очень большой конденсаторной батареи с энергией 5 000 — 30 000 *дж*. Иначе обстоит дело с крутизной возрастания. Уже очень маленькую конденсаторную батарею емкостью 0,1 *мкф* и напряжением заряда 10 *кв* соответственно 5 *дж* электростатической энергии можно разрядить через индуктивность 0,03 *мкгн* с возрастанием тока от нуля до амплитудного значения в течение 10^{-7} *сек*, так как время четверти периода дается формулой

$$T = \frac{\pi}{2}\sqrt{LC};$$

$$T \approx 1{,}6\sqrt{0{,}03 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}};$$

$$T \approx 0{,}9 \cdot 10^{-7} \text{ сек}.$$

Максимум тока, достигаемый за это время (без потерь)

$$I = \sqrt{\frac{CU^2}{L}} \approx 18\,000 \text{ а}.$$

Таким образом, крутизна возрастания равна

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{1{,}8 \cdot 10^4}{0{,}9 \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ а/сек}.$$

Скромные затраты состоят лишь из расходов на небольшую стирофлексовую конденсаторную батарею с компенсированной индуктивностью и маленький поджигаемый искровой разрядник. Хотя здесь ток тоже значителен, но он так кратковремен, что инерция, свойственная каждому телу, достаточна, чтобы исключить сдвиг отдельных частей проводов, так как за время 10^{-7} *сек* невозможно заметное ускорение и поэтому невозможно заметное перемещение отдельных элементов проводов, и работа в проводе может быть принята равной нулю. Подобной экспериментальной установкой может быть почти реализована достижимая граница крутизны возрастания тока. Увеличением мощности установки можно сделать немногое, так как с увеличением емкости конденсаторов одновременно повышаются вре-

мя разряда, а также объем и индуктивность всей установки, так что при этом увеличивается абсолютное значение амплитуды тока, но не крутизна его возрастания. Конструкция с компенсированной индуктивностью и разборной разрядной камерой, сконструированная для получения кратчайших вспышек света, без изменений

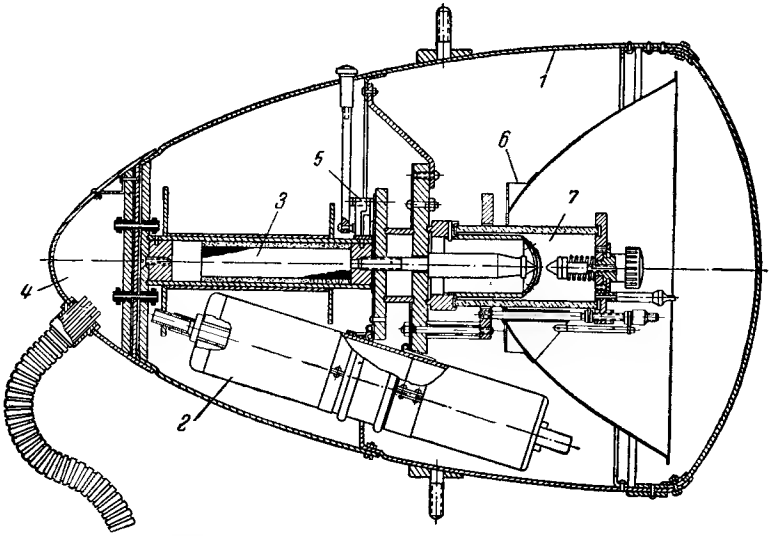


Рис. 42. Разрез суперстробоскопической лампы системы Фрюнгеля. Пример крайне высокой крутизны возрастания тока.

Пять конденсаторов *2*, имеющих последовательно включенные полистироловые обмотки, геометрическая индуктивность которых компенсируется двумя цилиндрическими частями бифилярного покрытия, расположены вокруг системы включающей искровой камеры *7* и расположенного внутри поджигающего импульсного трансформатора *3*. Обкладки конденсаторов фланцами непосредственно укреплены на двух отдельных соосных собирающих листах. Общая индуктивность равна 0,03 *мкгн*; наибольшая емкость (переключаемая посредством устройства *5*) 0,3 *мкф*; эксплуатационное напряжение 6—9 *кв*; крутизна возрастания тока при неинертном газе, наполняющем искровую камеру, $2 \cdot 10^{11}$ *а/сек*; при аргоне с высоким световыделением $7 \cdot 10^{10}$ *а/сек*; *4* — подключение питающего высокого напряжения, выполняемое в виде крышки; *6* — держатель зеркала; *1* — корпус лампы.

вполне пригодна для получения очень круто возрастающего тока; соответственно сказанному выше она представлена на рис. 42.

Батарея конденсаторов состоит из 3—5 стирофлексовых конденсаторов, расположенных вокруг оси системы; индуктивность каждого компенсируется медной оболочкой, которая связывает пять конденсаторов парой

листов, подводящих ток к электродам разрядной камеры. При поджигании электродом, управляемым от импульсного трансформатора, можно получить возрастание тока до амплитудного значения за $(0{,}09 \div 0{,}12) \cdot 10^{-6}$ *сек*. Потери излучаемой мощности уменьшаются выбором наполняющего газа. Измеренная индуктивность показанной здесь системы составляет 0,03 *мкгн* при емкости конденсатора 0,3 *мкф* и допускаемом эксплуатационном напряжении в импульсе 6—9 *кв*. Частота следования импульсов допускается до 300 в 1 *сек*.

2. ТРАНСФОРМИРОВАННЫЙ РАЗРЯД ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ПИКОВ ТОКА

В то время как безындукционно выполненным разрядным контуром можно получить очень высокую крутизну разрядного тока, максимальная амплитуда тока ограничена. Увеличение емкости конденсатора одновременно чисто пространственно увеличивает индуктивность, и при повышении стоимости установки получают лишь незначительное приращение амплитуды тока. Поэтому для получения максимальных абсолютных значений тока разряд нужно трансформировать. К таким трансформаторам предъявляют специальные требования. Здесь речь идет не о правильной по форме передаче заданного переменного напряжения, а о трансформации пакета энергии с первичной стороны на вторичную. Обычно на вторичной стороне требуется более высокий ток при меньшем напряжении — провода нужно согласовать по сопротивлению и индуктивности. Проектирование импульсной конденсаторной батареи производится в соответствии с требованиями экономичной конструкции. При нынешнем состоянии конденсаторостроения минимум затрат для заданного числа киловатт-секунд лежит при напряжении зарядки от 5 до 40 *кв*.

Такие импульсные трансформаторы должны иметь очень малую индуктивность со вторичной стороны при очень прочной связи между первичной и вторичной обмотками. Вторичная обмотка имеет только один виток и представляет собой медный блок, в пазах которого уложена первичная обмотка. При такой форме конструкции, описанной ниже, ни одна секция первичной обмотки не может сообщаться с другой.

Индуктивность такой вторичной обмотки можно легко рассчитать по элементарной формуле для индуктивности. Индуктивность равна, как известно,

$$L = \frac{10D^2n^2}{l} k, \text{ см},$$

где D — диаметр катушки; n — число витков; l — ее длина, *см*; k — поправочный коэффициент, который дается в таблицах, но здесь может быть опущен, так как он практически близок к 1.

Принимаем в качестве заданного трансформатор со вторичным витком длиной 50 *см* при диаметре только 15 *см*, причем число витков равно 1. Тогда индуктивность этого витка

$$\frac{2\,250}{50} = 45 \text{ см} = 0{,}045 \text{ мкгн}.$$

Так как здесь речь идет только об определении порядка величины, можно применять эту простую эмпирическую формулу, которая дает результат с точностью до 20%.

Вторичная обмотка системой медных полос соединяется непосредственно с потребителем, например, магнитным концентратором—катушкой Гельмгольца, таким образом, что общая индуктивность может составлять не более 0,055 *мкгн*. При этом соответствующей конструкцией получают чрезвычайно высокую механическую прочность вторичной обмотки из одного единственного витка и исключают механические импульсные потери. Допускаемый высокий коэффициент трансформации позволяет выбрать оптимальную величину конденсаторной батареи, т. е. можно выбрать напряжение и емкость конденсаторов такими, чтобы батарея была дешевой, а индуктивность в первичном контуре далека от критической. Если выбирают коэффициент трансформации 500 : 1, а индуктивность пропорциональна квадрату коэффициента трансформации и во вторичном контуре дополнительная индуктивность составляет 0,01 *мкгн*, то приведенная к первичной обмотке, она составляет величину, в 250 000 раз бо́льшую, т. е. 2 500 *мкгн* = 2,5 *мгн*. Это технически вполне удовлетворительная величина. При этом отпадает необходимость в дорогом кабельном соединении конденсаторной батареи с компенсирующими проводящими листами и в классическом способе простого параллель-

ного включения можно использовать достаточно много конденсаторов, которые разряжаются на первичную катушку через недорогое включающее устройство. При выборе включающего устройства здесь также имеется преимущество при вторичном токе, например, 500 000 *а*; при названном выше коэффициенте трансформации с первичной стороны ток будет только 1 000 *а*, так что здесь можно использовать обычный игнитрон или мощный водородный тиратрон. Возможно также использование простого механического ударного включателя, так как при обратном напряжении до нескольких киловольт включение тока с амплитудой до 1 000 *а*, которая имеет место в течение нескольких миллисекунд, не вызывает затруднений. Так как зарядка большой конденсаторной батареи обычно продолжается несколько секунд, можно отказаться от гасящей камеры, потому что при размыкании цепи не может возникнуть дуга. Конденсаторная батарея сама действует искрогасяще подобно конденсаторам, применяемым в слаботочной технике для защиты контактов.

Пример выполнения такого трансформатора показан на рис. 43. На листовом железном сердечнике *1*, изолированном тонким слоем *2*, расположен разрезанный по длине медный цилиндр *3*, концы которого для механической прочности укреплены на изолирующей полосе *4*. На медный цилиндр *3* плотно посажены медные кольца *5* с промежуточными бандажами *6*. Медный цилиндр *3* совместно с медными кольцами *5* и *6* образует вторичную обмотку, к которой присоединены медные листовые провода *7* и *8*, ведущие, например, к сварочным электродам, потребителю тока, магнитному концентратору и т. п. Между медными кольцами *5* расположена первичная дисковая обмотка *9*, выполненная, например, из семи дисковых секций, каждая из которых может иметь по 15 витков, как показано на рисунке. Тогда коэффициент трансформации равен 105 : 1 с очень незначительными потерями рассеяния в обеих цепях и соответственно этому также с минимально возможной самоиндукцией.

При очень большой нагрузке импульсного трансформатора описанного выше вида после длительной эксплуатации наступает динамическое разрушение обмоток и изоляции. Разрядный ток, протекающий в первич-

ных катушках *9*, в непосредственно окружающих вторичных кольцах *5* создает высокие и круто возрастающие импульсные токи; поэтому кольца имеют тенден-

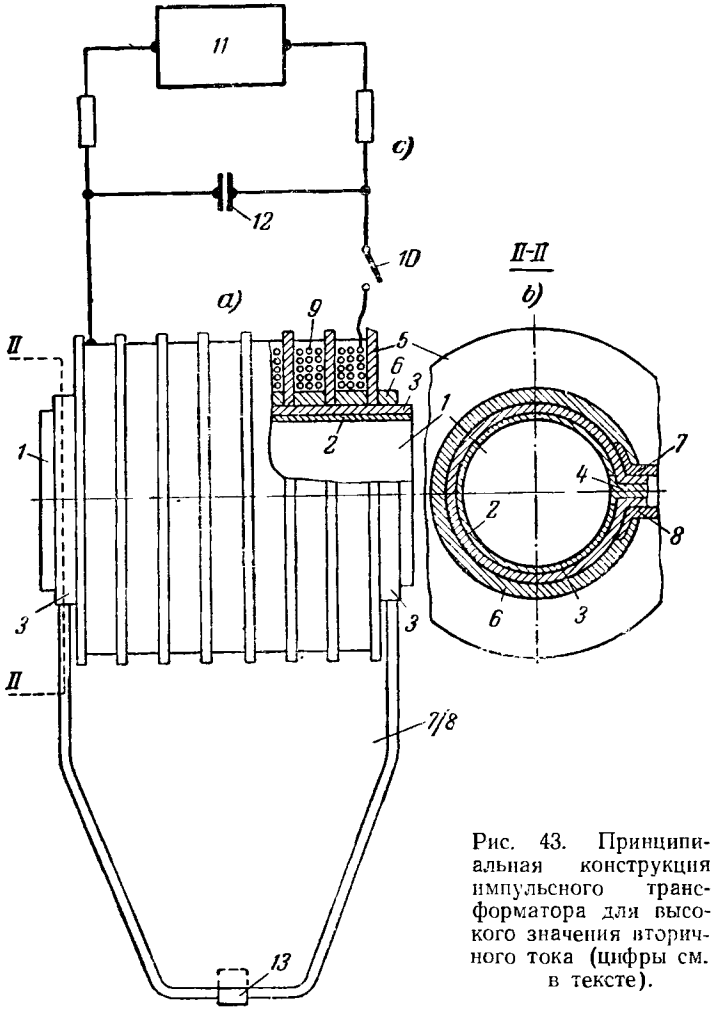


Рис. 43. Принципиальная конструкция импульсного трансформатора для высокого значения вторичного тока (цифры см. в тексте).

цию расширяться. Изменения формы, хотя и очень незначительные при каждом отдельном импульсе, после многих миллионов импульсов достигают заметной

величины и могут в результате привести к разрушению. Сила импульса может быть рассчитана по общим законам электротехники. Из амплитуды вторичного тока и конструктивно предусмотренной длины вторичного трансформатора получаем определенное число ампервитков на 1 *см*. 500 000 *а* дают при длине трансформатора 30 *см* 17 000 ампер-витков на 1 *см**. Исходя из этого, по общеизвестной формуле электротехники в зависимости от выбранного радиуса рассчитывается отталкивающая сила, которой подвергаются части вторичного витка. До сих пор обычно таких расчетов для трансформаторов не делали. Можно устранить основной недостаток, исключив пластическую деформацию. Можно нагружать механическую конструкцию, состоящую из цилиндрической части *6*, разрезанных колец *5* и, возможно, оболочки всей системы, силой, возникающей от действия тока, только в пределах упругих деформаций, т. е. в границах закона Гука для применяемого материала, например твердой меди. Катушка, по которой протекает большой вторичный ток, делается не жесткой формы, а упругой, однако с точным расчетом в соответствии с экспериментальным определением зависимости по закону Гука и принимая во внимание амплитуду движения отводящих вторичный ток листов *7* и *8*. Чтобы это движение не могло действовать на уложенные во вторичную обмотку секции первичной обмотки *9*, каждая отдельная секция последней должна выполняться как отдельное конструктивное целое с основательной изоляцией от вторичной обмотки; изоляция между обеими обмотками способствует затуханию колебаний. При этом изолирующие прокладки подвергаются действию разности амплитуд движения первичной и вторичной обмоток и предохраняют более чувствительные секции первичной обмотки от непосредственного силового воздействия. Демпфирующие прокладки должны иметь хорошие электроизолирующие, а также механически демпфирующие свойства, причем особенно постоянной должна быть вязкость и не должно проявляться влияние на нее температуры. Особенно пригодны для этого материалы на основе силиконов. Часто причиной разрушения таких

* При этом предполагают равномерное распределение тока, что при плотной сборке вторичного витка не ведет к большой ошибке.

трансформаторов является также тонкая железная пыль, притягиваемая чрезвычайно сильным магнитным полем, которая внедряется в обмотки или в пространство между первичной и вторичной обмотками; там усиливается трение и вследствие истирания обмоток уменьшается срок службы трансформатора. Демпфирующий материал препятствует этому, так как вследствие его вязкости в нем задерживается пыль. Через определенный промежуток времени демпфирующие прокладки нужно обновить. Действие демпфирования можно дополнительно повысить внесением уплотняющих прокладок между токоотводящими электродами *7* и *8*.

Сила, стремящаяся разогнуть вторичные секции и создающая наибольшую амплитуду на электродах *7* и *8*, вследствие того что толчок очень кратковременный, может быть поглощена массой, расположенной на электродных отводах или в непосредственной близости от них, например прочно связанной с секциями. Из технологических соображений предпочитают металлическую массу. Сила должна сообщить ускорение этой массе. Так как сила равна произведению массы на ускорение, можно большой, прочно укрепленной массой действительно уменьшить ускорение, а вместе с ним и общую амплитуду движения электродов *7* и *8*.

Следующим фактором, который создает силы между отдельными конструктивными элементами трансформатора, является обратное магнитное воздействие железного сердечника трансформатора на токоведущие элементы обмотки. Обычно трансформаторы делают так, чтобы обмотка и железный сердечник были конструктивно жестко связаны. Но в импульсных трансформаторах тока железный сердечник, который чаще всего выполняется стержневым, должен быть сделан подвижным по оси системы катушек. Этим достигают того, что сила взаимодействия между железным сердечником и катушками не может деформировать катушки, так как железный сердечник имеет возможность немного перемещаться при каждом импульсе, не передавая силу каждый раз системе катушек. Можно предусмотреть для сердечника смазываемые втулки. При неправильном конструировании трансформатора энергия разряда конденсатора *12* легко образует колебания в системе, например, при холостом ходе. Это создает особенно

высокие динамические нагрузки, так как силы возникают в каждом быстро следующем друг за другом периодах. Эти вредные колебания можно уменьшить выполнением сердечника из более толстых листов с большой петлей гистерезиса. При этом во время отдельного импульса, который при правильно согласованной вторичной нагрузке обычно протекает почти апериодически, обходится только малая часть петли и потери в железном сердечнике очень малы. Однако при холостом ходе трансформатора вследствие колебания энергии петля гистерезиса обегается многократно; в толстых листах дополнительно возникают вихревые токи, и это приводит к очень высокой потере энергии в железном сердечнике. Для решения этой задачи обычно в качестве материала сердечника выгодно применять листы из мягкого железа толщиной 0,5—1 *мм* или более толстые листы из динамной стали пониженного качества, которая применяется в статорах крупных машин постоянного тока. Такой материал в трансформаторостроении не применяют из-за присущих ему высоких гистерезисных потерь при эксплуатации на переменном токе, но в данном случае его выгодно применять, так как здесь требуются высокая проницаемость при значительном намагничивании и одновременно большие гистерезисные потери.

Чтобы сохранить малую амплитуду перемещений при очень высоком импульсном токе свыше 100 000 *а*, нужно позаботиться, чтобы изготовить вторичные элементы трансформатора с высоким механическим моментом сопротивления, например спрофилировать секции вторичного витка в U-образную форму. Практическая форма выполнения имеет вид чашеобразных, плотно подогнанных друг к другу секций, в которых, как во втулке, размещены секции первичной обмотки. В пазах, которые закруглены в соответствии с требованиями электростатики и выполнены давлением для сохранения сечения меди, расположены выводы первичных секций. При такой форме выполнения особенно просто использовать демпфирующий материал для одновременной защиты от пыли.

Чтобы ограничить продольные силы трансформатора, т. е. силы, параллельные оси катушек, по их амплитудному воздействию, целесообразно изготавливать общий

пакет из первичной и вторичной обмоток с предварительным механическим стягиванием болтами, параллельными оси. Если, например, при каждом динамическом импульсе общий пакет катушек стягивается силой до 3 *T*, то это ведет при каждом колебании усилия от 0 до 3 *T* к очень высокой амплитуде перемещений. Если предварительно всю систему затянуть силой 3 *T*, то сила колеблется от 3 до 6 *T*. Но под влиянием силы предварительной затяжки пакет катушек уже настолько прочно спрессован, что удвоение силы уже не может создать никаких относительных перемещений конструктивных элементов.

Дисковые секции первичной обмотки можно сделать особенно стабильными по форме заливкой их синтетической смолой. Синтетическая смола под названием «аралдит» имеет механические упругие свойства, приближающиеся к металлам. Демпфирующие жировые вещества способствуют высокой изоляции; благодаря всасыванию они автоматически заполняют трещины, образующиеся в твердой синтетической смоле, и благодаря этому сильно отодвигают срок выхода из строя дефектного трансформатора.

Исходя из этих основных положений, сконструирован импульсный трансформатор, показанный на рис. 44, представляющий собой дальнейшее развитие конструкции по рис. 43.

Рис. 44,*а* показывает сечение первичной дисковой секции. Она впечена в синтетическую смолу (аралдит). Каждая отдельная катушка состоит из двух полукатушек с четырьмя витками. Плоская профильная проволока *3*, как ясно из рис. 44,*б*, представляет собой насадку на катушке; через нее выходят присоединительные провода *4*. Обе половины катушки намотаны в противоположном направлении. Рис. 44,*с* показывает продольное сечение всего трансформатора. Все концы катушек *4* связаны поперечными проводами *5*. Через три или четыре секции размещена секция, охлаждаемая водой, состоящая из труб *11*, залитых в свинец *12*. При этом труба сначала обходит катушку на угол 300°, после этого делает поворот и возвращается так, чтобы она не образовывала короткозамкнутого витка. Дисковые секции вторичной обмотки образуют совместно один виток малой индуктивности *6*, *7*. Все вместе они надеты на

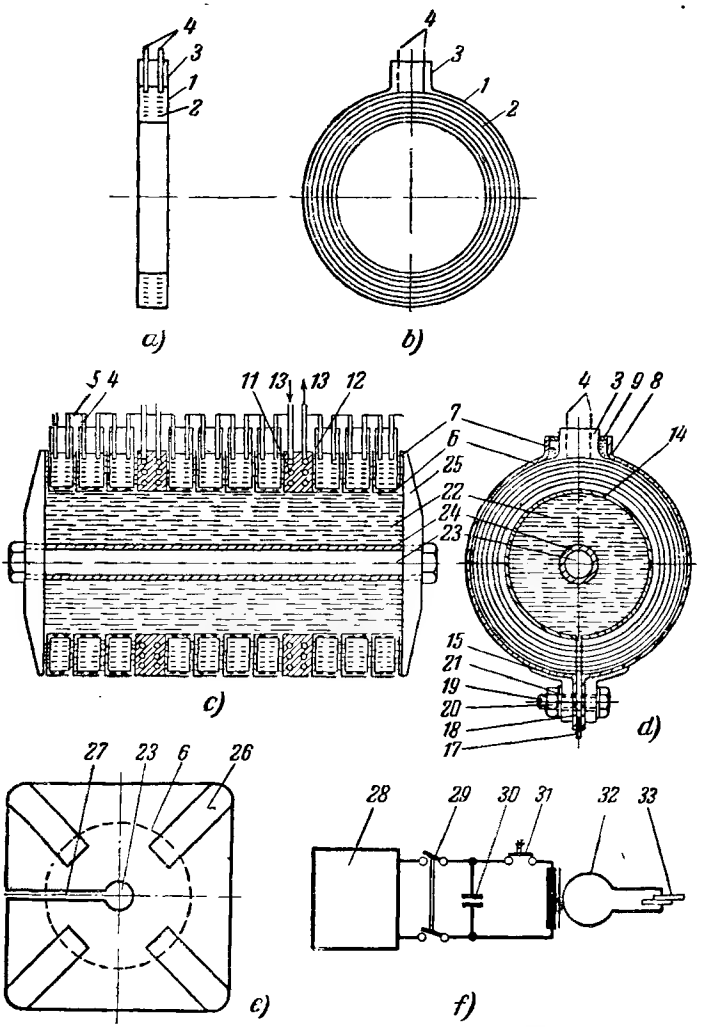


Рис. 44. Дальнейшее развитие импульсного трансформатора.

a — поперечное сечение уложенной в синтетическую смолу секции первичной обмотки; *b* — вид сбоку на секцию первичной обмотки; подвод тока по муфте *4*; *c* — поперечное сечение импульсного трансформатора высокого срока службы с секциями первичной обмотки, уложенными в синтетическую смолу, и водяным охлаждением *11* (цифры см. в тексте); *d* — поперечное сечение трансформатора по рис. 44,*c* (цифры см. в тексте); *e* — вид сбоку на трансформатор по рис. 44,*c* и *d*; *f* — схема со вторичной нагрузкой импульсного трансформатора, соответствующего рис. 44,*a*—*e* (цифры см. в тексте).

изоляционную трубу *14* и прочно стянуты центральным болтом *23*, изолированным трубой *24* от железного сердечника, с помощью двух профильных металлических крышек *25* так прочно, что создается предварительное натяжение около 3 *Т*. Поперечное сечение показано на рис. 44,*д*. Присоединительные полосы вторичного витка обозначены поз. *18*; между ними расположен тонкий изоляционный слой *17*. Полосы стянуты болтом *19*, *20*, изолированным внутренними втулками *21*, и прочно стягивают всю систему. Чтобы обеспечить минимальное сопротивление в месте выхода тока, к секциям вторичного витка (поз. *6*) к местам подключения, как видно внизу, присоединены приваркой или твердой пайкой усиления *15*, имеющие значительно увеличенное сечение. Железный сердечник состоит из толстых пластин *22*.

Боковые крышки отчетливо представлены на рис. 44,*е*. Они имеют прорез *27* и не образуют короткозамкнутого витка. В центре имеется отверстие *23*, через которое проходит болт; профильные ребра *26* служат для повышения момента сопротивления. Общая схема еще раз кратко представлена на рис. 44,*ж*. Генератор высокого напряжения *28* через выключатель *29*, автоматически срабатывающий при достаточном напряжении, заряжает конденсаторную батарею *30*. При достаточном напряжении для возбуждения импульса тока срабатывает контактор *31*; через первичную обмотку при коэффициенте трансформации, например, 275 : 1 и вторичном токе 275 000 *а* протекает только 1 000 *а*. Ко вторичной катушке *32* в соответствии с показанной на рис. 44,*ж* схемой подключен сварочный потребитель 33 *.

Любое количество подобных трансформаторов можно присоединять к общим токособирающим шинам. На практике удавалось листом шириной более 3 *м* собирать общий ток 1,2 млн. *а*. К сожалению, из-за сопротивления полосового провода невозможно уже отбирать подобный ток в одном месте, но он может быть снят проводами с очень большой шириной. Такая система

* При импульсной сварке необходимо подать напряжение 4—6 *в*. При двухточечной сварке два места сварки включены последовательно, так что импульсный трансформатор должен давать вторичное напряжение 8—12 *в*. При коэффициенте трансформации 275 : 1 конденсаторная батарея должна быть заряжена до рабочего напряжения 2 400—3 600 *в*.

может быть использована в сварочной технике для одновременного питания многих мест сварки или очень вытянутого в длину, подобного трубе намагничивающего провода, одного витка, так что может быть получено около 1 млн. *ав* на общей длине 3 *м*, соответственно около 3 500 *ав* на 1 *см* на большой длине.

Описываемая конструкция трансформатора позволяет отводить тепловые потери мощностью до 2 000 *вт*

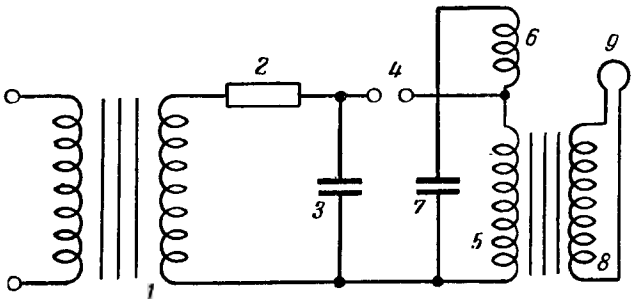


Рис. 45. Схема высокочастотного генератора с высокой частотой следования импульсов.

с помощью водяного охлаждения через охлаждаемые ребра и оказывается пригодной для многих десятков тысяч часов работы при одном разряде в 1 *сек*.

При применении двух трансформаторов, укрепленных друг против друга с обеих сторон концентратора Гельмгольца, можно в витке концентратора получить ток до 500 000 или даже 700 000 *а*.

Как особый случай в заключение рассмотрим трансформатор подобной конструкции длительной мощностью до 20 000 *вт*, предназначенный в сочетании с искровым разрядником с воздушным дутьем или искрогасящим разрядником в качестве включающего устройства для передачи импульсов очень высокой частоты. К такому водоохлаждаемому импульсному трансформатору можно подключить колебательный контур и питать его микросекундными импульсами с крутизной возрастания тока до 10^9 *а/сек*.

На рис. 45 высоковольтный трансформатор *1* через сопротивление *2* заряжает конденсатор *3*. Последний разряжается через искровой разрядник *4* на

обмотку *5*, совместно с которой он образует колебательный контур, настроенный на нужную частоту. Для снижения затухания обмотку *5* можно удлинить вспомогательной катушкой *6* и присоединить конденсатор *7* таким образом, чтобы вместе с катушками *6* и *5* возникала такая же частота. Применение искрового разрядника с воздушным дутьем имеет преимущество, так как включением второго колебательного контура первоначальная

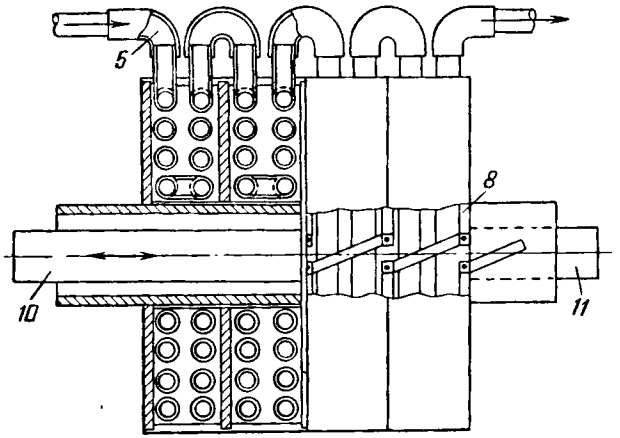


Рис. 46. Разрез импульсного трансформатора по позициям *5*, *8* с водоохлаждаемой первичной обмоткой.

импульсная энергия, выделяемая конденсатором *3*, моментально отсасывается через конденсатор *7* и индуктивности *5* и *6*. Вследствие этого в искровом разряднике *4* мгновенно возникает обесточенное состояние, которое приводит к быстрому гашению разрядника. Задача теперь заключается в том, чтобы таким импульсным трансформатором с первичной обмоткой *5* и вторичной обмоткой *8*, с которой жестко связан нагревающий проводник *9*, потребляющий высокий ток, преобразовать значительную мощность, например 20—30 *квт*, в импульсы высокой частоты при длительной работе. Для этого служит конструкция, изображенная на рис. 46. Первичную обмотку можно сделать из медной трубки *5*, по которой протекает вода, или поместить обмотку в постоянно протекающее масло. Уже очень малого количества воды 1 *л/мин*, которое можно прогнать через очень

тонкую медную трубку, удобную для изготовления обмотки, достаточно, чтобы при допускаемом повышении температуры до 60° С отводить 1 *ккал* (4 000 *вт·сек*) тепла в 1 *сек*. Применение трубки вместо сплошного провода не представляет особых трудностей вследствие малого требуемого объема охлаждения, так как медная трубка с наружным диаметром 3 *мм* и внутренним диаметром 2 *мм* при давлении воды 16 *ат* уже при 100 *м* длины дает возможность транспортировать нужное количество воды.

На чертеже можно видеть разрезанные дисковые секции вторичного витка, соответствующие ранее рассмотренным трансформаторам, внутри которых расположен железный сердечник *10*. Он сделан подвижным, так что не может создавать усилий, воздействующих на пакет катушек, и вызывать явлений истирания, уменьшающего срок службы трансформатора.

Отдельные вторичные витки *8* соединены в общую обмотку. Если прибор предназначен для генерирования высокой частоты, то вместо железа для сердечника можно взять ферритный материал, с помощью которого облегчается тонкая настройка резонанса между элементами контура *3—5—6—7*. Но этот ферритный стержень нужно также охлаждать водой, так как в нем при намагничивании легко могут возникнуть гистерезисные потери до 1 000 *вт* и более. В технике высокочастотной закалки принято ферритные концентраторы, а также нагревающий провод *9* (рис. 45) охлаждать водой под высоким давлением.

Е. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ КОНДЕНСАТОРА В ИМПУЛЬСЫ НАПРЯЖЕНИЯ

1. КАСКАДНАЯ СХЕМА

Принципиально можно энергию, накопленную в конденсаторе заданных емкости и напряжения, преобразовать с помощью специального импульсного трансформатора в импульс другого напряжения. Пока дело идет о многократном умножении напряжения, можно пользоваться схемой импульсного напряжения, предложенной Марксом. Ее достоинство заключается в том, что вклю-

чением сопротивлений на пути разрядного тока можно в широких пределах регулировать время возрастания и время спада и в соответствии с современными нормами [Л. 15] испытаний импульсным напряжением можно легко выдержать время возрастания 1 *мксек* и время спада 50 *мксек*. Однако схема с большим числом конденсаторов, которые для зарядки включаются параллельно, а при разряде — последовательно, дороже, чем варианты схемы с импульсными трансформаторами напряжения, и, вероятно, можно вообще сказать, что во всех случаях, в которых дело не идет о заданной точной кривой импульса напряжения, импульсный трансформатор должен давать более экономичное решение. В предложенной Марксом каскадной схеме конденсаторы одинаковых емкости и напряжения заряжаются параллельно через сопротивления и разряжаются последовательно через искровые разрядники или выключатели. Схемы включения представлены на рис. 47, 48, 49 и 50.

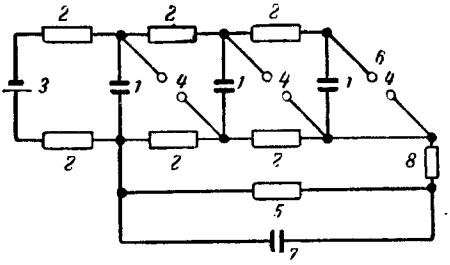


Рис. 47. Принципиальная схема умножения импульсного напряжения по Марксу. (Цифры см. в тексте).

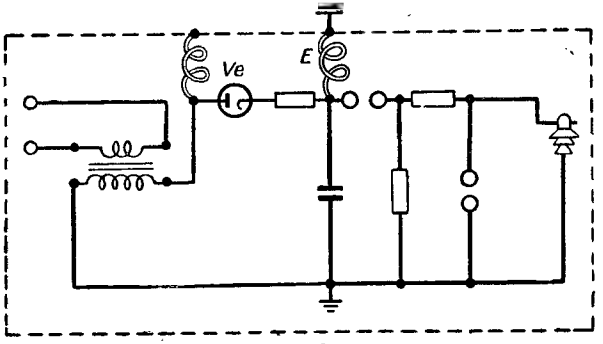


Рис. 48. Простейшая схема для получения импульсного напряжения (*E* — гибкий заземляющий провод, который присоединяется после экспериментального включения). (Обозначения см. по рис. 49.)

На рис. 47 три конденсатора *1* через равные сопротивления *2* соединены с заряжающим источником высокого напряжения *3*. В качестве включателя используют три

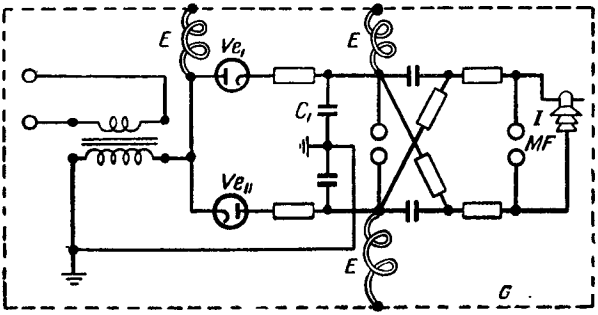


Рис. 49. Схема для удвоения величины напряжения (*E* — гибкий заземляющий провод, который присоединяется после экспериментального включения) (по Марксу).

E — гибкий заземляющий провод (фигура показывает защитное заземление после проведения опыта); *G* — ограничивающая сетка; *I* — изолятор в качестве испытываемого объекта; *MF* — шаровой искровой разрядник для измерения амплитудного значения напряжения; V_e — электрический вентиль.

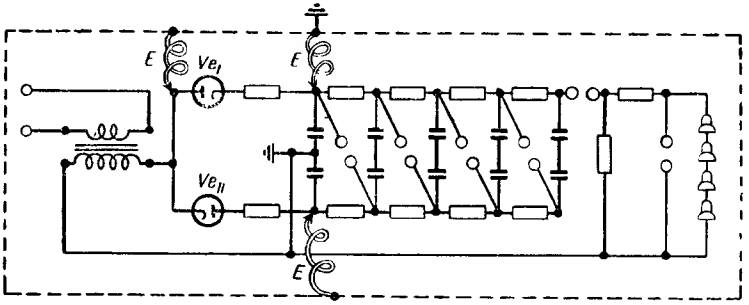


Рис. 50. Схема умножения для получения очень высокого импульсного напряжения (*E* — гибкий заземляющий провод, который подключается после экспериментального включения).

искровых разрядника *4*, отрегулированных таким образом, чтобы они не пробивались при напряжении источника *3*, но надежно срабатывали при двойном зарядном напряжении. Это условие нетрудно выдержать. Потребитель обозначен поз. *5*. Если после окончания зарядки

любой искровой разрядник, например изображенный справа на рисунке, поджигают электродом *6*, то в момент зажигания правый конденсатор подключается последовательно с первым и следует моментальный пробой обоих других искровых разрядников, так как напряжение круто возрастает. Как только оканчивается процесс разряда, т. е. напряжение на всех конденсаторах снова становится равным нулю, все три разрядника гаснут и снова начинается процесс зарядки через сопротивление 2. Расчет такой схемы прост.

Если принять, что на испытательный стенд должна быть подана энергия 10 000 *дж* при напряжении 10^6 *в*, то общая емкость определится из уравнения

$$A=\frac{1}{2}CU^2;\quad C=\frac{2A}{U^2}=\frac{2\cdot 10^4}{10^{12}}=2\cdot 10^{-8}\ \textit{ф}.$$

Целесообразно теперь разделить эту емкость на десять отдельных конденсаторов; при этом каждый конденсатор должен иметь величину, в 10 раз бо́льшую вычисленной, т. е. $2\cdot 10^{-7}$ *ф*$=0{,}2$ *мкф*. Зарядное напряжение каждого отдельного конденсатора должно соответствовать $^1/_{10}$ общего напряжения, т. е. должно быть равно 100 000 *в*. Искровой разрядник целесообразно образовать из шаров радиусом 4—5 *см* с расстоянием между ними около 5 *см*; при этом при 100 *кв* обеспечено отсутствие пробоя, а при 200 *кв*, наоборот, пробой происходит надежно. Подобное устройство осуществляется простым набором емкостей, как видно по 3 200-киловольтному устройству, представленному на рис. 51. Конденсаторы устанавливают один на другой подобно башне и заряжают через встроенные в башню сопротивления. Вместо сопротивлений *2* можно использовать также дроссели. О величине сопротивлений нужно сказать, что она выбирается для обеспечения постоянной времени. Если хотят общую емкость $10\cdot 0{,}2$ *мкф*, т. е. при параллельном включении 2 *мкф*, зарядить в течение 10 *сек*, то общее активное сопротивление должно быть выбрано, исходя из постоянной времени, равной около $^1/_3$ времени зарядки, т. е. около 3 *сек*. Это дает:

$$R=\frac{T}{C}=1{,}5\ \textit{Мом}.$$

Это сопротивление в примерной схеме из 10 последовательно включенных конденсаторов делится на 20 от-

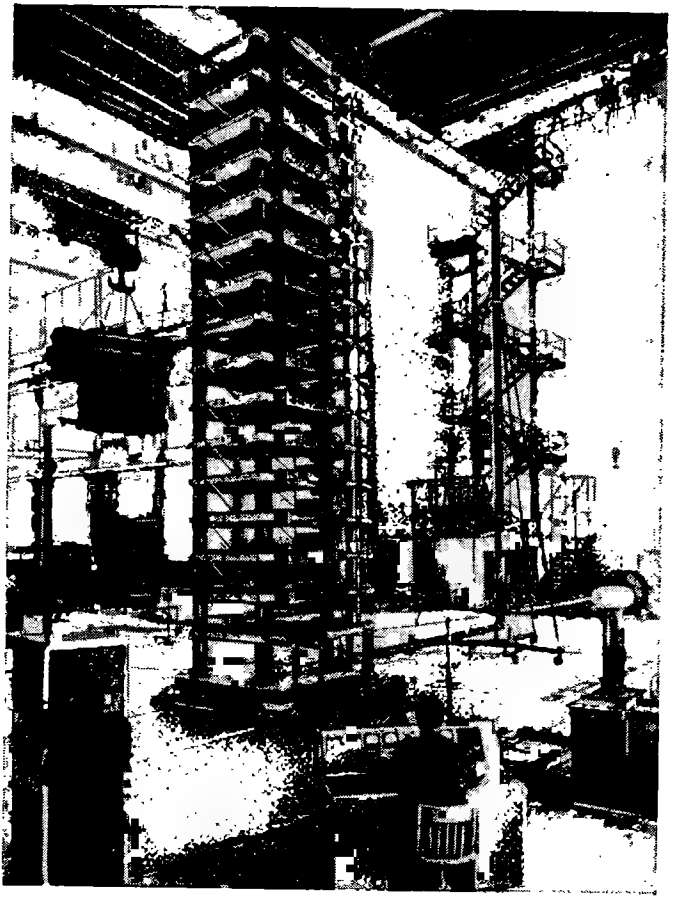


Рис. 51. Импульсный генератор фирмы Haefely в Базеле по схеме каскадного включения Маркса на напряжение 3,2 *Мв*.

дельных элементов по 75 *ком* каждый. Для уменьшения возможности образования скользящего искрового разряда каждое сопротивление должно иметь достаточную длину. В качестве наименьшей длины глазурованного сопротивления при напряжении 100 *кв* нужно принять 50 *см*. Так как подобные устройства никогда не подвергаются воздействию погоды при эксплуатации на откры-

том воздухе, не принимают во внимание уменьшение пробивных промежутков из-за атмосферных осадков.

Чтобы в подобных устройствах импульсного напряжения по Марксу обеспечить постоянную времени возрастания и падения напряжения, нужно правильно согласовать позиции *7* и *8* (рис. 47). Позиция *7* — емкость испытываемого объекта. В зарядную цепь еще дополнительно включают сопротивление *8*. Если теперь сопротивление *8* и емкость *7* подобрать так, чтобы произведение RC было равно 1 *мксек*, то время возрастания напряжения становится равным 1 *мксек*. Наоборот, для времени спада напряжения, равного 50 *мксек*, как, например, установлено в германских нормах VDE [Л. 15], произведение емкости конденсатора *7* и сопротивления *5* должно быть $RC=50$ *мксек*. Естественно, емкость конденсатора *7* должна быть малой против общей емкости последовательно включенных конденсаторов импульсного напряжения. В примере применения конденсатора с результирующей емкостью

$$2 \cdot 10^{-8}\ ф = 0{,}02\ мкф$$

допустимая емкость испытываемого объекта должна, пожалуй, составлять только 10% этого значения соответственно 10-процентному уменьшению напряжения в момент импульса, т. е. 2000 *пф*. Если испытываемый объект имеет емкость 2000 *пф*, то соответствующее ему зарядное сопротивление *8* для сохранения постоянной времени, равной 1 *мксек*, должно быть равно

$$R = \frac{10^{-6}}{2 \cdot 10^{-9}} = 500\ ом.$$

Разрядное сопротивление *5* для постоянной времени разряда, равной 50 *мксек*, должно быть в 50 раз больше, т. е. иметь величину 25 *ком*.

Нужно заметить, что конденсатор *7* при появлении импульсной волны не представляет никакого сопротивления и поэтому полное напряжение разряда кратковременно накладывается на сопротивление *8*. По своей электрической прочности оно должно быть таким же, как сопротивление *5* (если только вместо него не подключен испытываемый объект, например изолятор).

В импульсной схеме Маркса влияние искровых сопротивлений пренебрежимо мало. Оно проявляется только в том, что величина сопротивления *8* берется несколько меньше требуемой по расчету. Соответственно пример-

ной схеме при 10 искровых разрядниках с пробивным промежутком каждого 5 *см*, т. е. с общей длиной искрового промежутка 50 *см*, принимаем по искровой формуле Теплера искровое сопротивление

$$R = \frac{kL}{CU} = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{2 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{6}} \text{ ом} = 0{,}5 \text{ ом},$$

если, как упомянуто вначале, искровой коэффициент Теплера принять приблизительно $0{,}2 \cdot 10^{-3}$.

Но сопротивлением этого порядка можно пренебречь, если даже из-за отсутствия точного значения искровой постоянной нужно увеличить ее в 2 раза.

Если импульсную схему Маркса нужно применить для специальных технических целей, например для питания какой-либо специальной импульсной лампы с высокой частотой следования импульсов, то принципиально можно заменить сопротивления дросселями. Этим устраняют большие тепловые потери, которые при зарядке через сопротивление составляют 50% (см. разд. А,6). В этом случае настраивают всю схему на заданную частоту. Если она составляет 50 импульсов в 1 *сек*, то можно так согласовать дроссели, заменяющие сопротивления, с последующим заряжаемым конденсатором, чтобы их общая собственная частота равнялась 25 *гц*. Тогда через $^1/_4$ периода (т. е. 10^{-2} *сек* при частоте 25 *гц*) напряжение заряда конденсатора становится выше напряжения питающего источника, наступает искровой пробой и снова возбуждается колебательный контур. При частоте следования импульсов 50 *гц* в схеме с 10 последовательно включенными емкостными элементами, каждый по 0,2 *мкф*, при $\omega = 2\pi \cdot 25$ *сек*$^{-1}$ необходимая суммарная величина 20 раздельных дросселей для параллельной зарядки 10 конденсаторов с общей емкостью 2 *мкф*

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} \approx \frac{1}{25\,000 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} \text{ гн} = 20 \text{ гн}^*.$$

---

* Обычно конструируют так, что главная индуктивность включается непосредственно между источником высокого напряжения и первым конденсатором (в данном примере, таким образом, дважды по 10 *гн*), а все остальные 18 дросселей, включенных между конденсаторами, представляют собой только низкоиндуктивные однослойные цилиндрические катушки без железа с индуктивностью около 1/100 индуктивности обоих главных дросселей, т. е. по 1/10 *гн* = 100 *мгн*.

Видно, что при амплитуде напряжения до 100 *кв*, возникающего на полюсах этих дросселей, они становятся весьма объемистыми, тем более что 20 *гн* при обратном напряжении 100 *кв* должно быть получено при намагничивании постоянным зарядным током. По величине они должны быть сравнимы с измерительным трансформатором на напряжение 60 *кв*. Все-таки для мощных установок такое капиталовложение полезно, так как оно может чрезвычайно (например, от 40 до 70%) повысить к. п. д.

Для зажигания стартового искрового разряда может быть применен любой метод. Также практически не ограничено число ступеней такого импульсного включающего устройства, и только требуемая механическая стабильность заставляет ограничиться каким-либо разумным числом, например 20 ступенями.

2. ИМПУЛЬСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Импульсные трансформаторы работают в соответствии со схемой, представленной на рис. 52. Здесь *3* — источник зарядного тока, например мощный выпрямитель. Необходимы также зарядный дроссель или зарядное сопротивление *2* и конденсатор *1*, поставляющий общую энергию разряда и состоящий из отдельного элемента или батареи. Также необходим искровой разрядник *4* с поджигающим электродом *6*. Но в отличие от установок импульсного напряжения, описанных выше, здесь вся энергия, накопленная в конденсаторе, подается на первичную обмотку импульсного трансформатора с первичной катушкой *10*, вторичной катушкой *11* и железным сердечником *12*. Внешний потребитель *7* обозначен как сопротивление. Если произвести разряд через искровой разрядник *4—6*, то полное напряжение конденсатора при условии, что индуктивность или волновое сопротивление разрядного контура достаточно малы, будет приложено к малому числу витков первичной обмотки *10*. На практике можно успешно работать с напряжением от 3 до 30 *кв* на виток. При этом 3 *кв* на виток

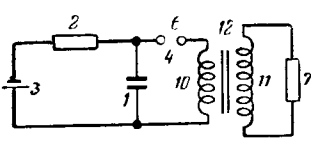


Рис. 52. Принципиальная схема апериодического заторможенного разряда через импульсный трансформатор (по Фрюнгелю).

соответствует очень маленьким импульсным трансформаторам с сечением сердечника несколько квадратных сантиметров, значение 30 *кв* на виток — очень большим трансформаторам с сечением сердечника более 100 *см*^{2}.

Рис. 53 показывает протекание такого разряда во времени. Кривая *2* показывает, что нарастающий ток возбуждает в соответствии с кривой намагничивания равномерно возрастающий магнитный поток в железном сердечнике *12*. В соответствии с этим напряжение, возникающее на вторичной стороне, круто возрастает до своего максимального значения, затем падает, начиная от точки перегиба кривой тока, и при максимуме тока переходит через нуль. При этом кратковременно заметно почти постоянное значение выходного напряжения.

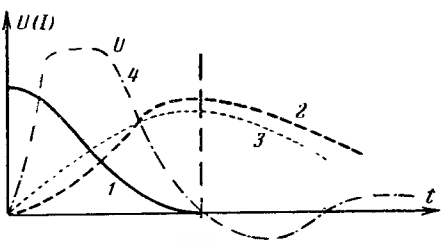


Рис. 53. Протекание во времени первичного напряжения *1*, напряженности магнитного поля *H*—*2*, магнитной индукции *B*—*3* и вторичного напряжения *4* в схеме по рис. 52.

Дальнейшее протекание тока и магнитного потока не показано, так как они не представляют интереса для механизма разряда. Только ожидаемое вторичное выходное напряжение зафиксировано продолжением штрихпунктирной кривой (сжато во времени).

Изменение направления вторичного напряжения имеет следующее физическое обоснование.

Кривая *3* на рис. 53 показывает сначала возрастающий, а затем спадающий магнитный поток, остающийся постоянным по направлению. По закону индукции во время снижения магнитного потока должно индуцироваться напряжение, противоположное напряжению, индуцируемому возрастающим магнитным потоком. Переход через нуль расположен, как упомянуто выше, в точке максимума потока, в которой нет изменений потока во времени. Появление положительной и отрицательной полуволн с равным суммарным током, но различными напряжениями, т. е. различной мощности, требуется физически так как во вторичной обмотке каждого трансформатора положительная и отрицательная суммы

зарядов, образуемые из произведения тока на время, должны быть равны между собой. Из этого вытекает невозможность полного подавления нежелательной обратной полуволны напряжения, но, вероятно, может быть достигнуто уменьшение амплитудного значения напряжения путем растягивания процесса во времени, причем площади кривых над нулевой линией диаграммы и под нею остаются равными друг другу.

Так как у импульсных трансформаторов напряжения имеет значение не энергетический к. п. д., а достигаемое амплитудное значение вторичного импульсного напряжения и его амплитудная мощность, упомянутой цели можно достигнуть, выбирая стали, допускающие высокое намагничивание, а при исчезновении поля дающие большие потери. Это не снижает амплитуды напряжения, однако потери приводят к замедлению исчезновения магнитного поля и вторичная э. д. с., возникающая при этом, остается малой. Если ее значение ниже 10% главного импульса, то она едва ли заметно искажает данные испытаний. Однако практически нельзя предсказать ход кривой напряжения после перехода через нуль. Чем хуже применяемый материал сердечника в отношении гистерезиса, тем медленнее и безвреднее протекает отрицательная полуволна напряжения. Для этой цели пригодны, например, простые толстые листы мягкого железа.

Чем прочнее связь вторичной катушки *11* с первичной катушкой *10*, тем больше возбуждение железного стержня *12* уравновешено противовозбуждением протекающего во вторичной обмотке тока потребителя. В соответствии с этим железный сердечник с возрастанием вторичной нагрузки возбуждается меньше и гистерезисные потери также уменьшаются. Коэффициент полезного действия устройства (энергия главного импульса: энергия разряда) сначала возрастает вместе со вторичным током, а затем падает до нуля при исчезновении напряжения, т. е. при коротком замыкании со вторичной стороны. Импульсные трансформаторы напряжения с прочной связью хорошо передают потребителю первичную энергию конденсатора также и при достаточном согласовании; при слабой связи они обеспечивают хорошее постоянство формы кривой тока и тем самым при омическом потребителе также хорошую форму кривой напря-

жения $\left(U=\frac{dI}{dt}R\right)$. При этом разряд в случае холостого хода не склонен к колебаниям из-за чрезвычайно большой петли гистерезиса.

Дальше следует привести следующие соображения для выбора материала и толщины листа.

Во время развития намагничивания железного сердечника *12* поле пронизывает еще весь железный сердечник, скин-эффект еще не может проявиться, так как возрастающее поле, возникающее из первоначального состояния, полностью пронизывает проводник или магнитный материал. Только в течение каких-либо переменных воздействий или изменения скорости нарастания потока возникает скин-эффект или другие поверхностные явления. На основе этого фундаментального свойства переходного процесса в момент включения в импульсных трансформаторах этого вида можно применять любые железные листы для изготовления сердечника *12*, так как он будет пронизываться полем. Одинаково хорошо применять как самые тонкие листы, так и листы толщиной 0,2 *мм*. Только при более толстых листах толщиной 0,35 или 0,5 *мм* наблюдается известное снижение напряжения, обусловленное вихревыми токами при возрастании намагничивания.

Решающим является хорошая изоляция между листами, ведь витковое напряжение может составлять 3—30 *кв* и такое же напряжение индуцируется вокруг железного сердечника. Это означает, что изоляция между листами должна выдерживать это напряжение, обеспечивая надежную эксплуатацию.

Полезным является и следующее соображение. Если величина конденсатора *1* около 1 *мкф* и индуктивность катушки *10* — 1 *мкгн*, то результирующее время разряда порядка 1 *мксек*. За такую короткую длительность импульса намагничивание в железном сердечнике может распространиться лишь очень незначительно. Поэтому в сердечниках подобных импульсных трансформаторов крутой градиент магнитного поля обнаруживается лишь на протяжении нескольких сантиметров от места возбуждения окружающей первичной обмоткой. Там, где возбуждение, производимое катушкой, невелико, магнитный поток практически отсутствует. Поэтому в таких трансформаторах бессмысленно применять замкнутый

железный сердечник, так как прямой импульс не успевает использовать уменьшение магнитного сопротивления вследствие замыкания сердечника. Пока за время прямого импульса происходит распространение поля, достаточного для перестройки магнитных доменов в железном сердечнике, не имеет значения, замкнут или нет магнитопровод вне поля обмотки. Можно в качестве правила указать, что железный сердечник должен выходить с обеих сторон катушки примерно на $^1/_4$ ее длины.

Расчет подобного импульсного трансформатора прост. Так как разомкнутый железный сердечник уменьшает магнитное сопротивление внутри катушки за счет коэффициента магнитной проницаемости и проницаемость железа примерно в 50—100 раз больше, чем у воздуха, можно представить железный сердечник как короткое замыкание внутренней полости катушки. По элементарным соотношениям соленоидов $^9/_{10}$ магнитной энергии находится внутри катушки, а $^1/_{10}$ — в ее внешнем поле, т. е. $^9/_{10}$ магнитного сопротивления также расположено внутри, а $^1/_{10}$ — вне катушки.

$$E_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} n^2 \Lambda I^2;$$

$$nI = \theta; \quad \Lambda = \frac{1}{R}; \quad R = R_i + R_a; \quad R_a = \frac{1}{9} R_i \rightarrow R = \frac{10}{9} R_i.$$

Тогда

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta^2}{\frac{10}{9} R_i} \quad \text{и} \quad \frac{9}{10} E_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta^2}{R_i}.$$

Здесь E_m — магнитная энергия;

L — индуктивность;

n — число витков;

I — ток в катушке;

θ — магнитодвижущая сила (м. д. с., *ав*);

Λ — магнитная проводимость;

R — магнитное сопротивление;

R_i — магнитное сопротивление внутри катушки;

R_a — магнитное сопротивление вне катушки.

Внесением железного сердечника магнитное сопротивление уменьшается до $^1/_{10}$ значения при воздушном сердечнике. Поэтому индуктивность первичной катушки в десять раз больше, чем расчетная по геометрической форме для катушки с воздушным сердечником. Приводим пример полного расчета импульсного трансформатора простейшей формы.

Постановка задачи. Импульсный трансформатор должен создать на испытываемом объекте емкостью 5 000 *пф* импульсное напряжение 500 *кв*. С первичной стороны из конструктивных соображений предусмотрено зарядное напряжение конденсатора 25 *кв*. Тогда импульсный трансформатор при холостом ходе должен иметь коэффициент трансформации 1 : 20, с учетом нагрузки добавляют еще 10% и выбирают 1 : 22. Потребление энергии испытываемым объектом емкостью 5 000 *пф* измеряется $1/2\,CU^2 = 625$ *вт · сек*. Так как допускается ослабление напряжения импульсного источника испытываемым объектом не более чем на 10%, так же как и в описанной выше схеме импульсного напряжения Маркса, необходимо в первичном конденсаторе иметь 10-кратный запас энергии, т. е. 6,25 *квт · сек* при зарядном напряжении 25 *кв*. Отсюда значение емкости

$$C = \frac{2 \cdot 10 \cdot 625}{U^2} = 20 \text{ мкф}.$$

Чтобы импульс имел достаточную крутизну возрастания, например 2 *мксек* до амплитудного значения с длительностью импульса еще несколько микросекунд, принимаем в первичной обмотке импульсного трансформатора 5 витков с напряжением 5 *кв* на виток. Железный сердечник принимаем длиной 800 *мм* с призматическим сечением 150×150 *мм*^{2}. Так как он должен выходить с каждой стороны первичной катушки на $^1/_4$ ее длины, первичная катушка должна иметь длину 550 *мм*. После этого определяем индуктивность первичной катушки по элементарной формуле для катушки с воздушным сердечником: $L = \frac{10 d^2 n^2}{l}$.

$L_{\text{железа}} = 10\, L_{\text{воздуха}}$ (10 — действительный коэффициент магнитной проницаемости при заполненном железом внутреннем поле катушки).

$$L = \frac{10 \cdot 10 \cdot 225 \cdot 25}{55} \cdot 10^{-9} \text{ гн};$$

$$L = 10^{-5} \text{ гн}.$$

Длительность четверти периода примерно эквивалентна длительности максимума вторичного импульса напряжения:

$$T = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC};$$

$$T = 1{,}6 \sqrt{10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-5}};$$

$$T = 25 \cdot 10^{-6} \text{ сек}.$$

Таким образом испытываемый конденсатор подает зарядный импульс продолжительностью 25 *мксек*, который после этого медленно затухает с длительностью примерно по нормам VDE: 50 *мксек*. Длительность возрастания составляет около 2 *мксек*. Последовательно включенный искровой промежуток между обмоткой и испытываемым объектом может обеспечить длительность возрастания 1 *мксек*, соответствующую 1/50 стандартной волны VDE. Видно, что можно обойтись элементарными конструкциями небольших размеров, причем достижимо любое вторичное напряжение обмотки, и первичное напряжение можно сделать непрерывно регулируемым без измеиения искрового разрядника.

Если желают подать энергию на омическое сопротивление, то на основе калориметрических измерений можно принять, что энергия, накопленная в первичном конденсаторе, в нашем случае 6,25 *квт·сек*, может быть передана на вторичную сторону с к. п. д. 70%. В данном случае это составляет 4 500 *вт·сек*. Так как длительность импульса установлена 25 *мк·сек*, средняя мощность, отводимая со вторичной стороны,

$$\frac{4\,500\ вт \cdot сек}{25 \cdot 10^{-6}} = 180\ Мвт.$$

Из $R = \frac{U^2}{N}$ допускаемое сопротивление нагрузки

$$R = \frac{25 \cdot 10^{10}}{180 \cdot 10^{6}} = 1\,400\ ом.$$

Таким образом, по приведенной схеме можно нагружать импульсами напряжения до 500 *кв* сопротивления до 1 400 *ом*.

При названном коэффициенте трансформации 1 : 22 пяти первичным виткам должны соответствовать 110 витков на вторичной катушке. Можно предусмотреть отводы во вторичной катушке и получить меньшие напряжения при большей допустимой нагрузке. Но необходимо позаботиться о том, чтобы обеспечить достаточно прочную связь между ответвлениями и первичной обмоткой, иначе энергия теряется бесполезными вспышками в железном сердечнике.

Устройство подобного рода для импульсных напряжений до 2 *Мв* при витковом напряжении до 10 *кв* имеет, следовательно, только 200 вторичных витков, уложенных на длине 2 *м*, причем в качестве масляного бака для уменьшения вихревых токов целесообразно использовать пластмассовый бак (из тровидура).

На практике используют механический ударный контактор вместо представленного на рис. 52 искрового разрядника и получают независимое от напряжения средство включения (в противоположность схеме Маркса). Контактор выключается электромагнитом, механизм снова взводится вручную.

На рис. 54—56 показаны общая схема, схема импульсного трансформатора и фото выпускаемой промышленностью импульсной установки напряжением

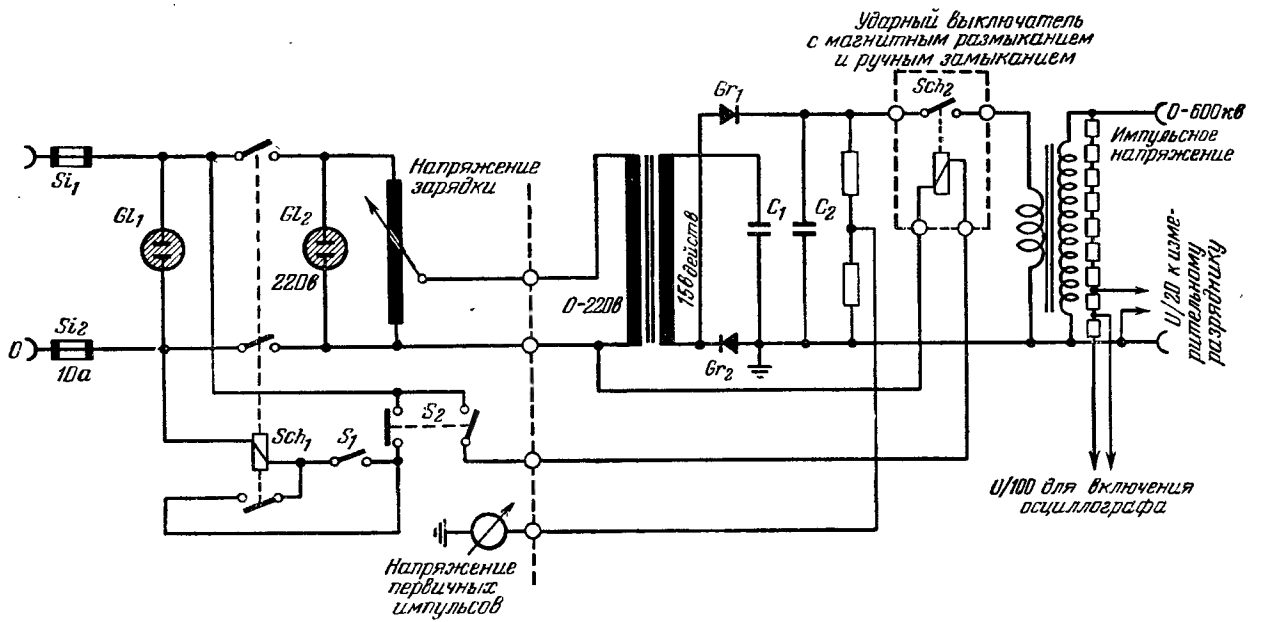


Рис. 54. Общая схема устройства для получения импульсного напряжения 600 *кв* с импульсным трансформатором, дающим плавное регулирование напряжения. Размыкание производится выключателем S_2. Несмотря на малое сопротивление вольтметра (50 *ком*), потери в нем незначительны.

При емкости 5 000 *пф* и напряжении 500 *кв* на омической нагрузке выделяется 180 *Мвт*. Длительность импульса 25—50 *мксек*.

600 *кв*, для которой действительно приводимое здесь описание. Она в состоянии передать от 180 до 200 *Мвт* на внешние сопротивления или при емкостной нагрузке 5 000 *пф* еще дать импульсное напряжение 500 *кв*.

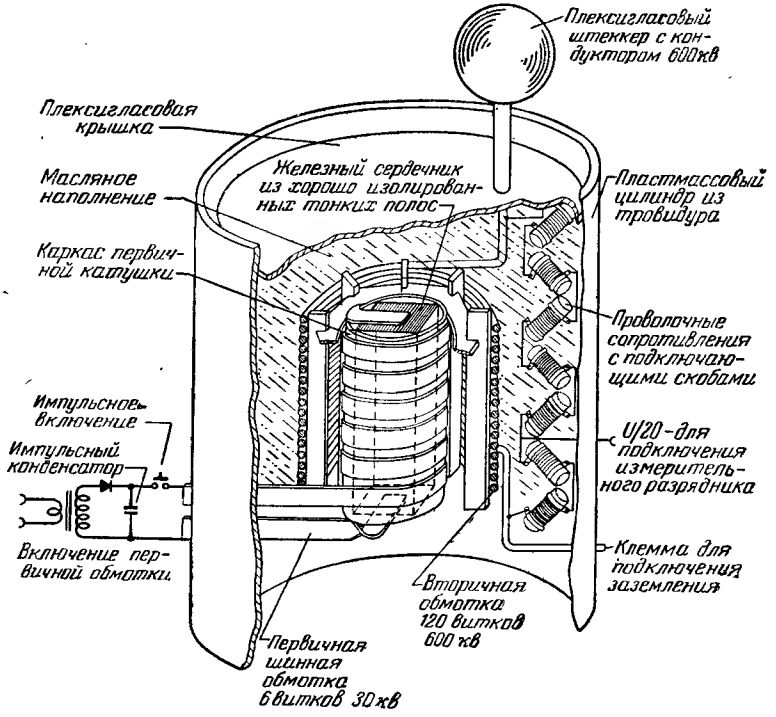


Рис. 55. Выполнение импульсного трансформатора для устройства на 600 *кв* по рис. 54 с плавно регулируемым напряжением от 0 до 600 *кв*; импульсная мощность 180 *Мвт*; допускаемая емкостная нагрузка 5 000 *пф*.

Напряжение регулируется плавно. Источник напряжения состоит в соответствии с этим из регулируемого трансформатора с последовательно включенными трансформатором высокого напряжения и выпрямителем, так что на импульсном конденсаторе 10 *мкф* напряжение может быть плавно изменено от 0 до 25 *кв*. Для измерительных целей параллельно вторичной катушке подключен делитель напряжения, который имеет сопротивление

50 *ком* и вследствие этого берет на себя только незначительную часть импульсной энергии. На нижнем 5-процентном отводе этого сопротивления можно проводить измерения конечного напряжения прецизионным измерительным искровым разрядником с освещением ультрафиолетовым излучением. При напряжении холостого хода 600 *кв*, которое получается при напряжении на конденсаторе 25 *кв*, на 5-процентном отводе имеется напряжение 30 *кв*. Соответственно этому измерительный искровой разрядник выполняется как шаровой разрядник диаметром 1 *см* с микрометрической калибровкой, так что можно производить очень точные измерения в пределах 3—30 *кв*. Короткие измерительные искровые промежутки нужны для измерений в микросекундной области. Кроме того, к 1-процентному отводу сопротивления можно подключить осциллограф, который позволяет наблюдать ход кривой напряжения на измеряемом объекте.

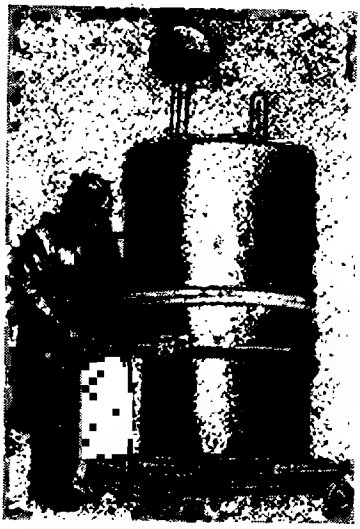


Рис. 56. Устройство для получения импульсных волн с крутым фронтом при напряжении 600 *кв* для испытания вентильных разрядников и изоляторов (по рис. 54). Фотография импульсного трансформатора со встроенным ударным включателем.

Большое преимущество этого устройства по сравнению с установкой импульсного напряжения с последовательно включенными конденсаторами заключается в том, что при коротком замыкании разрядного выключателя конденсатор остается незаряженным и не может снова зарядиться, так как омическое сопротивление катушки трансформатора очень мало и соответствует короткому замыканию. Новая зарядка конденсатора возможна лишь после ручного взвода механизма включателя. Второе преимущество заключается в том, что через вторичную катушку возникает гальваническая связь

между массой и полюсом высокого напряжения, так что никогда не может сохраниться остаточный заряд. Поэтому обслуживание подобных трансформаторов импульсного напряжения требует меньшей затраты времени и практически гарантирует безопасность для обслуживающего персонала. Для пуска в ход устройства требуется сознательное обслуживание: сначала нужно взвести включающий механизм, затем подойти к пульту управления, установить зарядное напряжение в соответствии с требующимся импульсным напряжением и затем перейти к обслуживанию кнопок обеими руками, так что производящий испытание привязан к месту управления.

3. УСТРОЙСТВО ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РАБОТЫ И ОЧЕНЬ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

По изложенному выше принципу трансформируемых разрядов также можно получать существенно более короткие импульсы, например, для радиоизмерительной (радарной) техники и генерирования корпускулярных лучей. Если используют описанный в разд. С,6 компенсационный метод для уменьшения собственной индуктивности конденсаторов таким образом, что батарея конденсаторов имеет действующую индуктивность 0,02 *мкгн*, то длительность импульса определяется индуктивностью первичной обмотки импульсного трансформатора, имеющей величину от 0,2 до 1 *мкгн*. Если принять, например, как минимально возможное значение индуктивности 0,2 *мкгн*, а емкость рабочего импульсного конденсатора 0,1 *мкф*, то получим длительность импульсного напряжения $2{,}5 \cdot 10^{-7}$ *сек*, соответствующую $^1/_4$ периода. Отсюда видно, что можно ожидать длительности импульса приблизительно 0,3 *мксек*. Необходимую для этого малую индуктивность 0,2 *мкгн* можно получить, используя один виток трансформатора, соответствующего по величине обычному 200-ваттному стержневого типа. Здесь не имеет смысла делать сердечник выступающим из катушки, но, с другой стороны, для уменьшения внешнего рассеяния целесообразно окружить катушку железом; очень эффективным мероприятием может быть применение Ш-образного сердечника. Связывающее ярмо можно удалить. Ш-образный сердечник окружает

катушку с двух сторон и выступает за ее открытые концы.

Если теперь на один виток посредством безынерционных искровых разрядников или трехэлектродной системой, или тиратроном подать напряжение до 10 *кв*, то на 6 витках получают исходное напряжение 60 *кв*. Хотя пробивной промежуток по Биндеру [Л. 16] чрезвычайно быстро снижается при коротких импульсах напряжения по сравнению со статическим напряжением в масле, все же можно изготовить систему с малыми размерами, соответствующими сердечнику трансформатора 200 *вт*, в обычной ванне с масляной изоляцией для 60 *кв* при 6 витках на вторичной катушке. Таким образом, получают импульсный генератор, имеющий длительность импульса 0,3 *мксек* при синусоидальной форме полуволны и отдаваемой мощности 2—10 *Мвт*. При этом вторичное напряжение в пределах возможностей управляемых искровых разрядников или тиратронов может регулироваться от 30 до 60 *кв*. Однако при этом требуется достаточное охлаждение, так как при периодической работе, например, 500 импульсов в 1 *сек* значительная мощность превращается в железном сердечнике в теплоту. Хорошее охлаждение достигается циркуляцией масла при монтаже в масляном сосуде. Ниже описана подробнее конструкция подобного рода.

Чертежи на рис. 57 показывают два примера выполнения. На рис. 57,*а* железный сердечник *1* квадратной формы, собранный из обычной трансформаторной стали, несет на гильзе *2* из изоляционного материала первичную обмотку *13* импульсного трансформатора, состоящую только из 2 или 3 витков. Эта первичная обмотка подключена (рис. 52) последовательно с искровым разрядником *4* на клеммы конденсатора *5*, который через сопротивления *6* и *7* заряжается от источника напряжения *8*. На первичной обмотке *3*, отделенная достаточной изоляцией, лежит вторичная обмотка *9* с 6—12 витками, к концам которой *10* и *11* подключен потребитель *12*.

Выбором размеров и уменьшением толщины пластин железного сердечника *1* степень связи катушек *3* и *9* приближают к единице так, что сопротивление потребителя *12* полностью включается в демпфирование колебательного контура *3*, *4*, *5*. Энергия, выделяемая не в главном импульсе, для достижения апериодической формы

уничтожается демпфированием потерями в железе сердечника *1*. Оптимальная величина железного сердечника и толщина пластин его набора для каждого типа

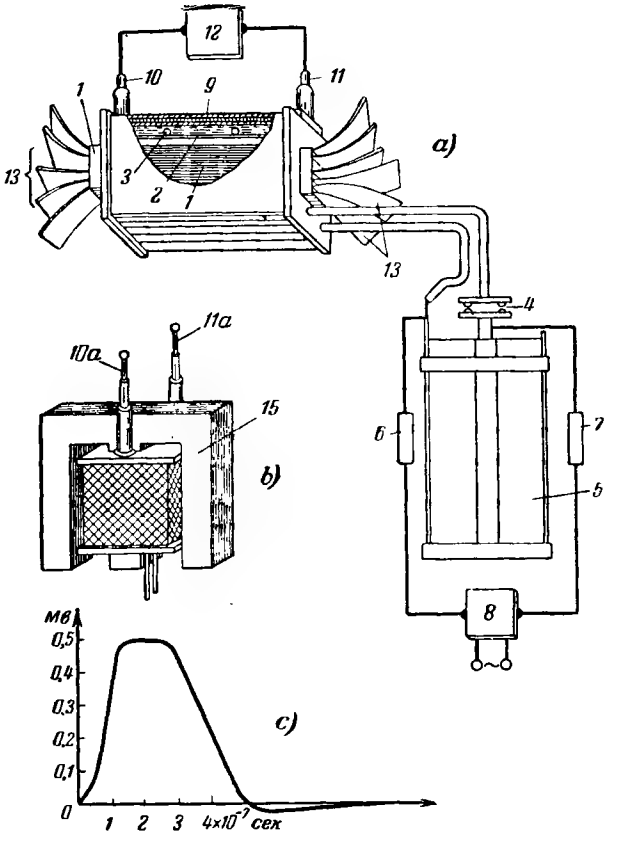


Рис. 57.

a — принципиальная схема импульсного трансформатора с охлаждаемым сердечником и безындукционным первичным контуром (цифры см. в тексте); *b* — открытый броневой сердечник для очень коротких импульсов в контурах по рис. 57,*a*; *c* — кривая вторичного напряжения в трансформаторах по рис. 57,*a* и *b*.

аппарата устанавливаются экспериментально по осциллограммам импульса напряжения на потребителе. Для точной регулировки в данном случае служат теплоотво-

дящие медные полосы *13*, которые вложены в железный пакет сердечника *1*. Их число может легко изменяться, а также можно менять демпфирующее действие путем вырезов в веероподобно разогнутых концах, воздействуя на форму импульса. Медные или алюминиевые листы вставляются в таком количестве в железный сердечник, чтобы при соответствующей мощности потерь не наступал перегрев сердечника, который может привести к порче изоляции листов.

На рис. 57,*b* показан трансформатор с Ш-образным сердечником *15*, средний стержень которого несет обмотку. Такие трансформаторы особенно пригодны для генератора импульсного напряжения с главной частотой первой гармоники более $0{,}8 \cdot 10^6$ *гц*. С их помощью удается получить импульсное напряжение, соответствующее кривой, представленной на рис. 57,*c*.

Изложенный здесь принцип импульсных трансформаторов показывает, что они по существу не являются импульсными трансформаторами. Импульсный трансформатор по современной технической терминологии — это преобразователь, трансформирующий поданный с первичной стороны импульс напряжения с сохранением его формы. При этом лишь меняется величина напряжения соответственно коэффициенту трансформации. В рассмотренных трансформаторах (Stoßtransformator) напротив, сам трансформатор создает импульс напряжения на вторичной стороне при конденсаторном разряде неопределенной формы.

На втором примере выполнения показано, как можно конструктивно крайне уменьшить индуктивность общего разрядного контура, расположенного вне трансформатора, аналогично сказанному в разд. С. Рис. 58,*a* показывает схему для получения импульсного напряжения с шириной импульса до 10^{-6} *сек*, рис. 58,*b* дальнейшее усовершенствование для импульсов напряжения с длительностью импульса только $3 \cdot 10^{-7}$ *сек*. Рис. 58,*c* дает эскиз кожуха для двух последовательно включенных конденсаторов. Рис. 58,*d* показывает выполнение с двумя параллельно включенными конденсаторами.

В соответствии с рис. 58,*a* на торцах конденсатора *1* выступающие обкладки припаяны к пластинчатым шайбам *2* и *3*. Пластина *2* связана с решеткой *4*, которая может иметь форму кожуха, окружающего конденсатор,

или состоять из трех симметричных стержней или полос. Пластина *3* через безындукционное сопротивление *5* соединена непосредственно с одним полюсом искрового

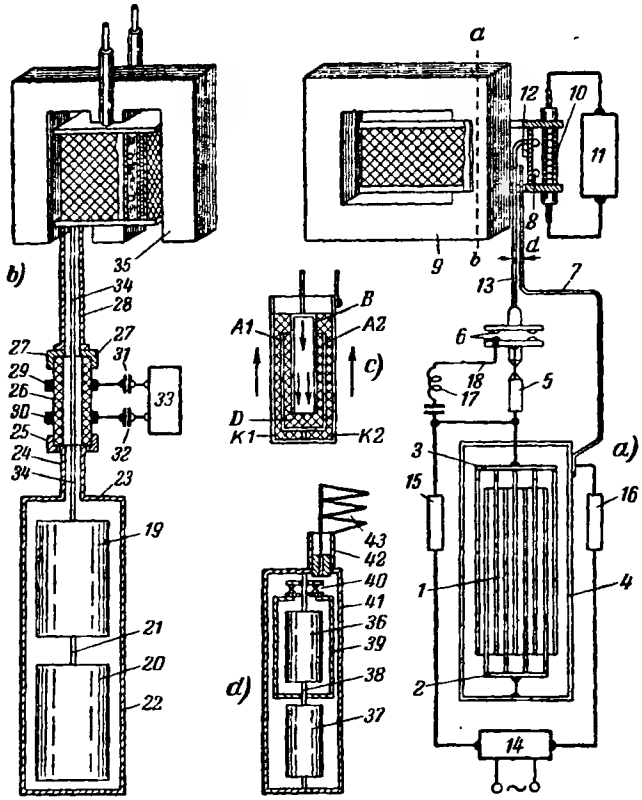


Рис. 58.

a — принципиальная схема безындукционного питания первичной обмотки импульсного трансформатора; *b* — симметричное относительно оси расположение первичного контура с конденсаторами; импульсный трансформатор с незамкнутым Ш-образным сердечником при длительности тока, недостаточной для замыкания магнитных силовых линий в железе сердечника; *c* — схематичная конструкция безындукционного импульсного конденсатора; *d* — схема безындукционного параллельного соединения обмоток двух импульсных конденсаторов.

разрядника *6*. Кабель *7*, присоединенный к решетке *4*, проходит мимо искрового разрядника *6* и подходит к первичной катушке *8* трансформатора с железным

сердечником *9*, вторичная обмотка *10* которого питает потребитель *11*. Первичная катушка *8* состоит только из 2 витков и расположена на изоляционной трубе *12*. Внутри этой трубы параллельно оси *a—b* расположен кабель *7*. Обратный кабель *13* также расположен параллельно *a—b*, и между ними сохраняется расстояние *d*, необходимое для предотвращения пробоя. Кабель *13* связан со вторым полюсом искрового разрядника *6*. Питающее напряжение от выпрямителя *14* подается на конденсатор *1* через сопротивления *15* и *16* для защиты от перенапряжений. Отдельные разряды искрового разрядника поджигаются известным способом с помощью вспомогательного искрового разрядника, который образуется из одного полюса искрового разрядника *6* и поджигающего электрода *18*, проходящего через этот полюс и питаемого от поджигающей катушки *17*. Время между отдельными поджиганиями должно быть достаточным для того, чтобы конденсатор *1* полностью зарядился от источника напряжения *14*. Пики тока, возникающие при разряде конденсатора *1* в таком приближающемся к апериодической границе колебательном контуре *1*, *6*, *8*, становятся тем больше, чем меньше величина демпфирующего сопротивления *5*. Доказано, что уже малейшего отклонения от параллельного расположения кабелей *7* и *13* достаточно, чтобы вызвать такое сильное повышение величины демпфирующего сопротивления *5*, что происходит очень заметное падение выходной мощности. В противоположность этому чем плотнее прилегают друг к другу кабели *7* и *13* и чем тщательнее во всех других местах устраняют возможность возникновения магнитного поля вне железного сердечника *9*, тем меньше может быть величина демпфирующего сопротивления *5*. Можно даже полностью обойтись без него, если требуемое затухание создавать основательным утолщением листов в трансформаторном сердечнике *9* (что улучшает связи между катушками *8* и *10*) или если концентричной укладкой проводов полностью или частично подавить магнитное поле рассеяния.

Устройство этого рода с двумя последовательно включенными конденсаторами показано на рис. 58,*b*. Конденсаторы *19*, *20* соединены друг с другом штифтом *21* и окружены сеткой *22*, которая подключена кольцевой шайбой *23* к трубе *24*. Труба *24* оканчивается вольфра-

мовым кольцом *25*, в которое запрессован керамический цилиндр. *26*. На его головке сидит вольфрамовое кольцо *27*, которое связано с трубой *28*. Вольфрамовые кольца *25* и *27* совместно с керамическим цилиндром *26* образуют безындукционный разрядник со скользящей искрой, зажигание которого производится вставленными в цилиндр *26* кольцеобразными поджигающими электродами *29* и *30*, как только к ним через конденсаторы *31* и *32* будет подведен соответствующий импульс напряжения от управляющего устройства *33*.

К обратному по отношению к связывающему штифту *21* полюсу конденсатора *19* присоединен кабель *34*, который проходит через трубу *24*, керамический цилиндр *26* и трубу *28* к первичной обмотке импульсного трансформатора *35*; обратным проводом от первичной обмотки к искровому разряднику служит труба *28*. Провод, подводящий ток к первичной обмотке, выведен параллельно оси катушки.

При устройстве подобного рода значение

$$R_d = \sqrt{\frac{4L}{C}}$$

так мало, что можно полностью отказаться от включения особого гасящего сопротивления, гарантируя достаточную мощность, передаваемую потребителю, и вследствие этого при емкости конденсаторов от 0,01 до 0,2 *мкф* и первичном напряжении от 10 до 20 *кв* вблизи апериодической границы можно получить пики тока от нескольких сотен до тысячи ампер. Полный разрядный процесс оканчивается за время от $1 \cdot 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-7}$ *сек*, а так как промежуток времени менее 10^{-6} *сек* уже может быть сравним со временем распространения магнитного поля в железе, для конструкции, в которой собственная частота колебательного контура выше $0{,}8 \cdot 10^6$ *гц*, целесообразно применять Ш-образный сердечник описанного выше типа. Подробно описанная здесь проводниковая техника широко применяется сегодня для подключения конденсаторных разрядных контуров для высокотемпературных исследований газовых разрядов. Она впервые была разработана автором в 1942—1943 гг. для так называемых испытательных аппаратов.

Конденсатор 0,1 *мкф* при напряжении 10 000 *в* накапливает энергию 5 *вт·сек*. Если эта энергия действует в течение $2 \cdot 10^{-7}$ *сек*, то за этот промежуток времени развивается мощность 25 *Мвт*, половина которой, т. е. округленно 12—15 *Мвт*, может быть использована потребителем. К потребителю высокого напряжения и малого тока (рентгеновская импульсная трубка и т. п.) уже этими весьма скромными средствами может быть подведено напряжение 30—200 *кв* при высокой амплитуде тока. Для радиолокационной техники, таким образом, получаются крайне простые импульсные установки большой мощности. Правда, при таких простых формах импульсных трансформаторов их применение ограничено в дециметровой области на триодах с их низкими требованиями к форме кривой импульса. Но для магнетрона и клистрона имеется возможность корректировать форму импульса.

Значение решетки или сетки для конденсатора *1* или цепи конденсаторов *19*, *20* понятно из рис. 58,*с*, на котором показан схематически разрез через конденсатор со средней обкладкой *B*, диэлектрическим слоем *D*, наружными обкладками A_1 и A_2 и стержнями решетки, служащими обратным проводом, K_1 и K_2. В процессе разряда контур, замыкаемый токами смещения в диэлектрике, обтекается токами в направлении стрелок, поэтому эти токи создают противоположно направленные магнитные поля рассеяния, которые, как и в бифилярных обмотках, практически взаимно уничтожаются. Если конденсатор имеет форму цилиндрического тела, то внутри пространства, окруженного сеткой, возникает кольцевое магнитное поле. Подобные же соотношения имеют место и для концентрической системы проводов по рис. 58,*b*.

На практике часто возникает потребность создавать емкость колебательного контура не из последовательно, а из параллельно включенных конденсаторов. В этом случае для достижения такого же подавления всех наружных магнитных полей требуется двойная сетка, как на рис. 58,*d*. Конденсатор *36* связан с конденсатором *37* штифтом *38*. К этому штифту присоединена внутренняя сетка *39*, от которой провод ведет к одному полюсу искрового разрядника. Оба других вывода конденсаторов *36*, *37* связаны между собой наружной сеткой *41*, к которой присоединена труба *42*. Она ведет к первичной

катушке *43* импульсного трансформатора. Обратным проводом трансформатора служит кабель, концентрично расположенный в трубе *42* и присоединенный ко второму полюсу искрового разрядника *40*.

В приведенных примерах генерирование круто возрастающих импульсов напряжения трансформированием разрядного тока становится возможным потому, что разряд протекает безынерционно и магнитные поля рассеяния в разрядном контуре почти полностью подавляются. Первое обеспечивается включающим искровым разрядником, последнее достигается ферромагнитным сердечником трансформатора и крайне незначительной индуктивностью всех включающих элементов и проводов.

Наименьшая достигаемая посредством импульсных трансформаторов описанного выше типа продолжительность импульса со вторичной стороны равна 0,1 *мксек* при развиваемой омической мощности 2 *Мвт*. Против ожидания здесь также могут быть использованы тонкие листы динамного железа. (При толщине листов 0,1 *мм* и сечении сердечника 9 $см^2$ со вторичным напряжением аппарата 60 *кв* были измерены продолжительность полупериода 0,1 *мксек* и к. п. д. 40% при омическом сопротивлении у потребителя).

В импульсных устройствах этого типа уже обращают внимание на диэлектрические потери в конденсаторной батарее, так как диэлектрические потери сильно возрастают с повышением частоты импульсов. Некоторые диэлектрики при возрастающей частоте показывают уменьшающийся угол потерь, другие—увеличивающийся. Целесообразно применять керамические диэлектрики или диэлектрики на полистироловой основе, которые имеют достаточно малый угол потерь при высоких частотах. В этом случае охлаждение конденсаторной батареи излишне, однако требуется отводить продувкой воздухом неизбежные тепловые потери на сопротивлениях разрядного контура.

В заключение нужно еще заметить, что по схеме, представленной на рис. 59, можно получать импульсы улучшенной формы. Питающий трансформатор высокого напряжения 1 *в* малых установках радиолокационной техники должен давать 30 *кв* при первичном напряжении 10 *кв*. Селеновый выпрямитель 2 предназначен для полного выпрямления в обоих направлениях; конденсатор *3*

служит для сглаживания; через зарядное сопротивление *4* происходит периодическая зарядка импульсного конденсатора *5*, который состоит из керамической батареи или полистироловых конденсаторов. Этот конденсатор разряжается через управляемый искровой разрядник *6*, причем поджигающий электрод *7* периодически зажига-

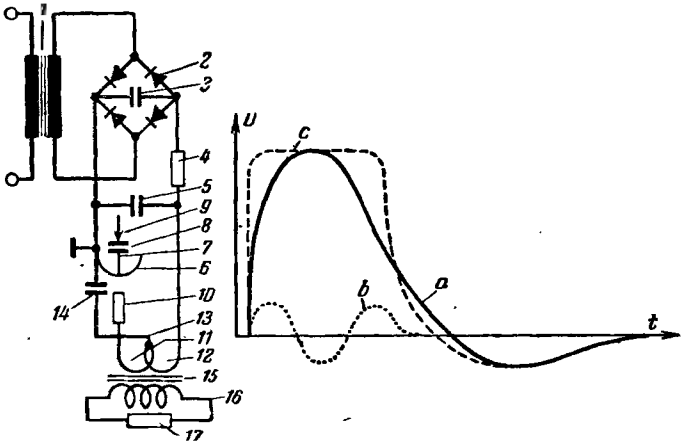


Рис. 59. Принципиальная эксплуатационная схема импульсного трансформатора с искровым разрядником с воздушным дутьем с коррекцией кривой напряжения по Фрюнгелю и Марксу (цифры см. в тексте).

ется, например, от водородного тиратрона через конденсатор *8* в направлении стрелки *9*. Противоположный электрод *10*, являющийся катодом, в соответствии со сказанным в разд. В соединен с первичной обмоткой импульсного трансформатора, причем первичная обмотка разделена на две части: *11* и *12*. Отвод *13* подключен к корректирующему конденсатору *14*. Поз. *15* представляет собой обычный Ш-образный железный сердечник трансформатора, *16* — вторичную катушку, а *17* может быть радиолокационным аппаратом или другим импульсным потребителем. Часть первичной обмотки *11* совместно с конденсатором *14* настроена на тройную частоту контура, состоящего из конденсатора *5* и всей первичной обмотки *11* и *12*. При этом получают основную кривую, обозначенную буквой *a*, и дополнительную корректирующую кривую *b*, которые совместно дают результирующую кривую *c*. Третья гармоника сглаживается сложе-

нием и вычитанием из главной кривой: в результате получается строгая трапециевидная кривая. Легко удается осциллографическим контролем и регулированием конденсатора *14* удерживать постоянной верхнюю амплитуду кривой *c* с точностью ±1% на протяжении около 0,3 *мксек*.

Установки такого типа в области напряжений 20—60 *кв* хорошо подходят для получения трапецеидальной формы импульса высокого напряжения.

Приведем пример. Если число первичных витков импульсного трансформатора равно 3 и отвод сделан от первого витка, то корректирующий конденсатор имеет равную величину с импульсным конденсатором, так как индуктивность катушки при отводе от первого витка по сравнению с полным числом витков 3 уменьшается в 9 раз, т. е. устанавливается тройная частота при равной величине конденсаторов. Поразительно, что при этом почти не происходит уменьшения амплитуды, так как во включенном контуре не появляется добавочной утечки энергии, а происходит лишь изменение формы кривой.

Существенна необходимость согласования действующего сопротивления потребителя с апериодическими граничными условиями первичной стороны разрядного контура. Таким образом, форма кривой зависит от нагрузки.

Пример расчета

Дано: радиолокационная лампа с напряжением во время импульса 30 *кв*, со средним током 5 *а* и соответственно импульсной мощностью 150 *квт*. Отсюда омическое сопротивление равно 6 *ком*. Если для импульсного трансформатора выбирают первичное напряжение 6 *кв*, то коэффициент трансформации должен быть 1 : 5, а из соображений резерва 1 : 6. Тогда сопротивление потребителя, приведенное к первичной стороне трансформатора, равно $^1/_{36}$ действующего со вторичной стороны значения, т. е. округленно 150 *ом*. С учетом к. п. д. устройства, равного 60%, приведенное сопротивление нужно уменьшить до 100 *ом*, так как потери на вихревые токи или гистерезисные потери в железе во время намагничивания проявляют себя, как дополнительное активное сопротивление. Таким образом, апериодическое граничное сопротивление

$$\sqrt{\frac{4L}{C}} = 100 \text{ ом}.$$

Отсюда получаем индуктивность первичной стороны трансформатора

$$L = 2\,500 \text{ ом}^2 \cdot C.$$

Величину конденсатора можно получить из количества потребной энергии. Со вторичной стороны в нашем примере действует

импульсное напряжение 30 *кв* при длительности импульса 0,3 *мксек*. При этом ток равен 5 *а*. Отсюда получается 150 *квт* · 0,3 · 10^{-6} *сек* = =45 *мвт* · *сек* в импульсе. Из соображений резерва первичный конденсатор при напряжении 6 *кв* может иметь накопленную энергию 70 *мвт* · *сек*. Тогда его величина получается

$$\frac{140 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{6}} \; \phi = 4\,000 \; пф.$$

Тогда индуктивность составляет 100 *мкгн*. Если диаметр обмотки равен 5 *см*, а длина обмотки также 5 *см*, то число витков

$$n = \sqrt{\frac{L \cdot 1}{10 \cdot 10 D^2}},$$

где индуктивность L *см**, в нашем примере 100 000 *см* = 10^{-4} *гн*. Отсюда число витков получается 14. Число вторичных витков должно быть в 6 раз больше, т. е. 84. Железный сердечник Ш-образной формы должен соответствовать мощности 100—200 *вт*. При частоте следования импульсов 1 000 в 1 *сек* и передаваемой энергии 70 *мвт* · *сек* в отдельном импульсе средняя мощность составляет 70 *вт*. Зарядный источник тока при зарядке через сопротивление должен иметь мощность, равную 200 *вт*, для того чтобы в результате наличия избытка мощности можно было создать простую конструкцию и работать с простейшей зарядкой через сопротивление. Если необходимо улучшать форму кривой, то нужно сделать отвод на $^1/_3$ обмотки, т. е. с четвертого или пятого витка (точное место отвода проверять осциллографом) и подключить на массу конденсатор емкостью 4 000 *пф*. Примерный расчет приведен для обычных триодов для дециметровых волн.

Как показывают приведенные выше примеры, можно простыми средствами получить импульсную мощность в несколько мегаватт с помощью очень простых генераторов, которыми вполне удовлетворительно могут служить клистроны и другие мощные радиолампы. Импульсные генераторы могут быть принципиально сконструированы и без ламп. Из-за удобного регулирования напряжения и мощности они пригодны для испытательных установок.

Однако пока необходима незначительная импульсная мощность порядка 150 *квт*, становится нецелесообразным применять обходный путь трансформирования импульсов. Проще по схеме рис. 60,*а* питающий конденсатор *1* включить через водородный тиратрон *2* прямо на разрядное сопротивление *3* (здесь зарядное сопротивле-

* При расчете числа витков по геометрическим данным удобна старая система единиц CGS с единицей индуктивности 1 *см* для индуктивности 10^{-9} *гн*. Поэтому в отдельных местах этой книги еще используется эта единица.

ние *4*, а заряжающий источник высокого напряжения *5*). Далее подключают колебательный контур или магнетрон с его обычным образом выполненными анодом и катодом *6* и *7* параллельно сопротивлению *3*, которое в случае колебания эмиссии катода *7* имеет возможность воспринять избыток энергии. Однако при этом требуется водородный тиратрон для соответствующей частоты следования импульсов с высоким обратным напряжением. Так как технические данные промышленных магнетронов изменяются в очень широких пределах, а, кроме них, так же широко применяются клистроны для генерирования сантиметровых волн, необходимо выбирать соответствующие данные для каждого конкретного случая в таблицах ламп. Здесь нельзя дать общее правило. Важно всегда знать допускаемую импульсную амплитуду тока и рабочее напряжение. Для сглаживания острого пика кривой используют снова корректирующий элемент с тройной частотой, причем техника включения подобна описанной выше при импульсном трансформаторе. Для стабилизации импульсов можно также использовать линию задержки времени, представленную на рис. 60,*b*, которая дает импульс постоянного напряжения. Так как магнетронные лампы принципиально требуют постоянного напряжения на все время импульса, рекомендуется применение этой линии задержки. По этой схеме конденсатор делится на отдельные емкости *1a*, *1b*, *1c*, *1d*, связанные между собой индуктивностями *8a*, *8b*, *8c* и *8d*. Как только загорится лампа *2*, сначала разряжается конденсатор *1d*, затем через индуктивность *8d* разряжается конденсатор *1c*, после чего через *8c*—*1b* и т. д. Таким образом, получают с помощью этой линии задержки выравнивание импульса необходимой длительности; импульс, представленный на рис. 60,*c*, который на чертеже имеет сильно преувеличенную волнистость, может считаться технически достаточно близким к идеальному импульсу прямоугольной формы. В зависимости от допускаемой волнистости число отдельных конденсаторов и индуктивностей в подобной линии задержки может быть значительно увеличено [Л. 20]. Длительность импульса составляет 0,1—1 *мксек*, причем усовершенствование ламп приводит к укорачиванию импульса. Так как раскачка магнетрона длится около 0,1 *мксек*, то здесь лежит граница для современной техники. Клистро-

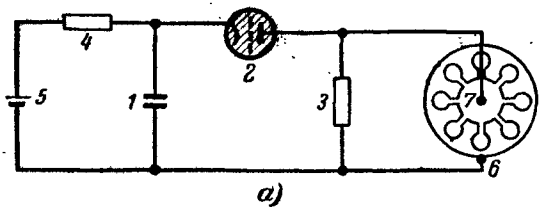


Рис. 60а. Принципиальная схема магнетрона с включающей лампой.

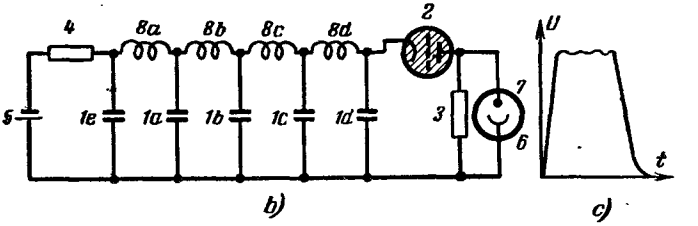


Рис. 60b,c. Магнетронная схема с линией задержки времени для получения трапецеидальной или прямоугольной формы импульса.

ны, так же как и так называемые триоды с дисковыми впаями, менее ограничены, но не обеспечивают достаточно точной излучаемой частоты. Поэтому для радио и радиолокационных целей в настоящее время еще широко применяются магнетроны. Любая импульсная лампа в обычных технических радиоизмерительных устройствах «запускается» посредством линии задержки и водородного тиратрона. Сумма накопленных энергий в конденсаторах *1a—1d* должна быть равна энергии, накопленной в конденсаторе *1* по рис. 60а. Чтобы создать защиту от источника напряжения, необходим маленький конденсатор *1*, который служит входом линии задержки. Величина волнового сопротивления индуктивностей и емкостей *8a* и *1a* должна быть равна действительному сопротивлению включенного магнетрона. Если лампа имеет, например, напряжение включения 10 *кв* при токе эмиссии 2*a*, то это соответствует ее сопротивлению 5 000 *ом*. Волновое сопротивление $\sqrt{\frac{L}{C}}$ всей линии задержки должно быть также равно 5 000 *ом*, чтобы не возникало нежелательного отражения энергии конденсаторного разряда на магнетроне и не создавались паразитные потери или искусственное фальшивое эхо.

Таким образом, линия задержки по формообразованию импульсов так же требовательна, как импульсный трансформатор. Принимают, что отдельный элемент линии задержки должен быть в состоянии в течение 10^{-7} *сек* с избытком покрыть энергетическую потребность магнетрона, равную 10 *кв*, 2 *а*. Отсюда количество энергии в одном конденсаторном элементе должно быть равно $2 \cdot 10^{-3}$ *вт·сек*, что при напряжении заряда 10 *кв* соответствует 40 *пф*. Так как индуктивность должна быть определена из необходимого волнового сопротивления 5 000 *ом*, то из

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

индуктивность

$$L = Z^2 C = 10^{-3}\ гн = 1\ мгн.$$

Таким образом, для длительности импульса 0,4 *мксек* необходимо соответственно сказанному выше предусмотреть в линии задержки четыре конденсатора емкостью 40 *пф* каждый и четыре индуктивности по 1 *мгн*.

4. МАНИПУЛЯТОРЫ С ИСКРОВЫМИ РАЗРЯДНИКАМИ[1] ПО МАРКСУ

Целью и задачей манипуляторов с искровыми разрядниками является генерирование импульсов высокого напряжения приблизительно прямоугольной формы для манипуляции генераторными лампами. Приведем требования, предъявляемые к магнетрону (LMS 101): напряжение около 30 *кв*, ток до 300 *а*, т. е. импульсная мощность 9 *Мвт*, длительность импульса 1 *мксек* или короче, число импульсов 1 500 в 1 *сек*, колебания длительности не более 10^{-7} *сек*, колебания амплитуды меньше 1%, форма импульса по возможности прямоугольная. Для генерирования таких импульсов, с одной стороны, требуются известные технические мероприятия по включению, с другой — необходим отдельный включающий прибор.

Технические мероприятия по включению будут здесь лишь кратко рассмотрены. Необходимы главный контур

[1] Доклад, сделанный 20 октября 1944 г. на совещании по радиоизмерительным манипуляторам. С тех пор в этой области больше не работали, но, как и раньше, она остается актуальной.

тока и поджигающий контур. Для главного контура тока имеются следующие основные варианты:

1. Непосредственное получение высокого напряжения разрядом конденсатора без применения трансформатора или импульсной схемы умножения. При выборе этого пути манипулятор должен включать полное напряжение; далее требуется источник постоянного высокого напряжения, т. е. большой выпрямитель. Для источника постоянного напряжения необходимы, например, шесть вентилей с обратным напряжением 40 *кв* и током 0,5 *а* (например, американский тип 705а).

2. Применение импульсного трансформатора. В промышленности конструируются в настоящее время импульсные трансформаторы с коэффициентом трансформации от 1 : 2 до 1 : 4, при которых приходится мириться с некоторым отклонением кривой от прямоугольной формы.

3. Применение схемы умножения импульса. Этот вариант самый желательный для высоких напряжений и мощностей, так как установка с постоянным напряжением выхода получается компактной, а вся остальная схема может быть изготовлена надежно в отношении изоляции. Со схемой умножения импульсов необходимое напряжение 30 *кв* можно получить, например, четырьмя каскадами по 7,5 *кв*. Эти четыре каскада одинаковы, конденсаторы каждого из них заряжаются через высокие сопротивления или, еще лучше, дроссельные катушки и тогда периодически подключаются последовательно к включающему искровому разряднику. Этот искровой разрядник нужно выполнить как манипулирующий искровой разрядник с искусственным поджиганием.

Манипулятор лишь регулирует вход импульса, в то время как прямоугольная форма должна достигаться при соблюдении названных границ техническими мероприятиями включения. Они уже описаны: это наложение различных синусоидальных или экспоненциально протекающих напряжений или применение линии задержки. Крутое падение напряжения после прохождения импульса можно получить без манипулятора, так как дуга обрывается при переходе напряжения через нуль. Это может быть выполнено также с помощью второго включающего прибора, который периодически отсекает напряжение разряда в нужный момент.

Постоянный импульсный ток можно также получить включением лампы с характеристикой насыщения.

Чтобы получить надежную работу манипулятора, необходимо обеспечить медленное нарастание напряжения на конденсаторе после каждого импульса, для того чтобы манипулятор во время деионизации не зажегся снова

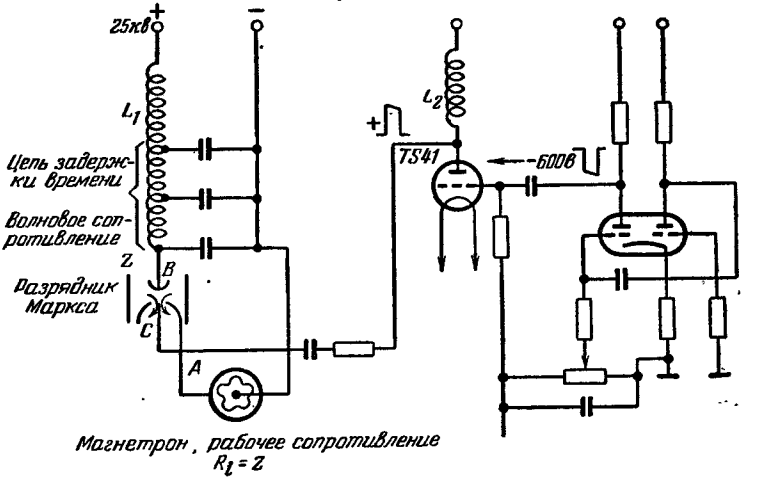


Рис. 61. Принципиальная схема магнетрона с манипулятором, искровым разрядником и ламповым управлением частоты следования. Мультивибратор периодически запирает манипуляционную лампу с мощной эмиссией (TS41); накопленная в дросселе L_2 энергия выделяется в виде поджигающей искры в искровом разряднике Маркса (по Марксу, Крефту и Хельмхену).

восстанавливающимся напряжением. Это обеспечивается применением дросселя, замедляющего нарастание напряжения. Напряжение на модуляторе при каждом зажигании должно иметь приблизительно одинаковую величину.

На рис. 61 дан пример схемы, которая отвечает указанным требованиям. Источник постоянного напряжения подключается слева вверху к точкам, обозначенным плюсом и минусом. Он заряжает через дроссель L_1 конденсаторы линии задержки. Одновременно возрастает напряжение между электродами A и B искрового разрядника манипулятора. Каждый раз после зарядки конденсаторов линии задержки через L_1 до значения источника

постоянного напряжения с помощью представленной справа схемы зажигания поджигается искровой разрядник манипулятора. Происходит замыкание *A* и *B*, подключающее линию задержки на магнетрон. Волновое сопротивление линии задержки выбирают равным сопротивлению магнетрона, таким образом, что на магнетрон приходится половина напряжения, до которого заряжаются конденсаторы линии задержки. Длительность импульса напряжения зависит от параметров линии задержки. Через заданное время напряжение на магнетроне круто падает, дуга между *A* и *B* гаснет и возобновляется зарядка линии задержки.

Схема зажигания на рис. 61 хорошо зарекомендовала себя на практике. На сетку *TS41* с помощью мультивибраторного поджигающего аппарата подается периодический прямоугольный импульс напряжением около 600 *в*. При прохождении этого отрицательного по отношению к катоду импульса напряжения лампа внезапно запирается и прерывается текущий через лампу постоянный ток. Ток в L_2 не может изменяться моментально, и электрод *C* через обозначенные в схеме сопротивление 7 *ком* и емкость 2 *мкф* заряжается положительно; вследствие этого между электродами *C* и *B* возникает зажигающая искра, которая исчезает через короткое время.

Важнейшей частью устройства для генерирования импульсов является включающий аппарат. Можно работать либо с неподвижными электродами и искусственным поджиганием (как в схеме рис. 61), либо с подвижными электродами. Известные до настоящего времени аппараты работают как вакуумные электронные лампы или лампы с избыточным давлением (рис. 62); производились также опыты с тиратронами. Здесь будет описан новый прибор, который работает при атмосферном давлении или избыточном давлении протекающего воздуха.

Установка по рис. 61 оказывается хорошо пригодной в качестве импульсного искрового разрядника. Подобное устройство применяется уже несколько лет как вентиль для высоких постоянных напряжений и больших токов, связанных с силовыми передачами постоянного тока.

Как уже упоминалось, между электродами *B* и *C* проходит поджигающий импульс. В этот момент между электродами *A* и *B* имеется высокое постоянное напря-

жение, значение которого близко к напряжению пробоя между этими электродами. Особенно хорошей оказывается следующая полярность: электрод *B* заземлен, электрод *A* отрицательный, поджигающий штифт *C* при поджигании положителен.

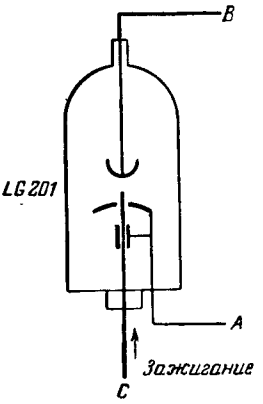


Рис. 62. Оплавляемый искровой разрядник типа LG201 с центральным управляющим электродом. Предусмотрен маленький цилиндрический конденсатор, расположенный между *C* и *A*, непосредственно под электродами, для получения круто возрастающей ионизации.

В соответствии с теорией названная полярность должна быть особенно благоприятной для импульсных искровых разрядников. Между острым положительным электродом и большим хорошо скругленным противоположным электродом уже при относительно низком напряжении образуется предварительный разряд в форме положительных разрядных каналов. Электрическое поле между электродом *A* с одной стороны и *B* и *C* с другой стороны только незначительно искажается, пока *B* и *C* находятся под одним потенциалом, так как острый электрод *C* только немного выступает над кольцевым электродом *A*. Однако, как только с помощью поджигающего контура острый электрод становится внезапно положительным, сила поля на острие резко повышается. Вследствие этого моментально возникает упомянутый положительный разрядный канал на штифтовом электроде. Одновременно происходит пробой между штифтовым электродом и окружающим его кольцевым электродом. Возникшая при пробое искра ионизирует пространство между электродами *A* и *B* (рис. 61 и 62) и обеспечивает дополнительное достаточное число электронов. Подобный процесс газового пробоя (*1* — образование положительных каналов разряда; *2* — образование мощного положительного пространственного разряда в области ударной ионизации; *3* — повышение падения напряжения вблизи катода; *4* — ударная ионизация положительных ионов перед катодом) происходит в течение чрезвычайно короткого времени.

Для полного законченного пробоя требуется только движение электронов и не требуется движения ионов. Это важно для оценки времени пробоя. Скорость электронов во много раз больше скорости положительных ионов; она может иметь величину порядка скорости света. Измерением электронно-лучевым осциллографом в институте Роговского время пробоя оценено в 10^{-9} *сек*. В Институте высоких напряжений в Брауншвейге опыты с особенно крутыми импульсами напряжения на коротких петлях провода также показали, что при напряжении 60 *кв* может быть достигнуто время пробоя величины порядка 10^{-9} *сек*. В доказательство этого приводят тот факт, что на петле провода длиной 30 *см* чрезвычайно крутым импульсным напряжением получают разность потенциалов 60 *кв*, которую можно измерить шаровым искровым разрядником. (Этот результат одновременно имеет большое значение для получения ультракоротких волн искровыми разрядниками. Мощные коротковолновые излучения можно получить импульсными напряжениями лишь в том случае, если крутизна этих импульсов по меньшей мере равна крутизне напряжения получаемых высокочастотных колебаний.)

Таким образом, должны быть выполнены оба названных условия, а именно:

1) ударное, сильное повышение напряженности поля на штифтовом электроде и

2) одновременная ионизация всей области пробоя.

Это приводит к чрезвычайно малому времени пробоя и при точной подаче поджигающего напряжения к очень малому рассеиванию момента пробоя. К манипуляторам предъявляют требование, чтобы разброс моментов зажигания был не более 10^{-7} *сек*. Это требование, как показывают опыты фирмы Телефункен, полностью выполняется описанными здесь манипулирующими искровыми разрядниками. Разброс в этих опытах был существенно меньше 10^{-7} *сек*.

В импульсном искровом разряднике применяют поток воздуха, обозначенный на рис. 61 стрелкой. Скорость воздуха между штифтовым и кольцевым электродами составляет около 100 *м/сек*. Этот поток не влияет на точность момента начала импульса, поджигание и ход напряжения, так как путь воздуха в течение 1 *мксек* составляет только 0,1 *мм*. Протекающий воздух имеет

задачей только охладить электроды между двумя импульсами и произвести деионизацию, а также отвод тепла из пространства между электродами. При каждом поджигающем импульсе электроды и пространство между ними должны находиться в одинаково охлажденном и деионизированном состоянии, если должна производиться регулярная работа также и при высоких значениях тока. Все четыре электродных пятна дуги должны обдуваться потоком воздуха. Притекающий снаружи воздух должен, кроме того, уничтожать осадки продуктов горения на стеклянном цилиндре.

Импульсный искровой разрядник при длительной эксплуатации безупречно работает как относительно условий зажигания, так и относительно деионизации и теплоотвода. Дуга расположена в области сильного потока воздуха, благодаря чему она поддерживается прямой. Во время эксплуатации искра пробоя равномерно перемещается по штифтовому электроду и окружности отверстия в электроде *A*. Вследствие того что дуга не задерживается на одном месте, устраняется воздействие искры пробоя на последующие искры.

С точки зрения конструирования манипуляторов с искровым разрядником нужно еще упомянуть, что разброс моментов пробоя искрового разрядника, работающего в воздушной среде, становится очень большим при питании синусоидальным переменным напряжением 50 *гц*.

Обстоятельными исследованиями импульсных искровых разрядников установлены целесообразные размеры электродов, благоприятная полярность, необходимые давление и количество воздуха в зависимости от заданных электрических величин. Оказалось, что максимальное обратное напряжение во время эксплуатации искрового разрядника может быть повышено до 25 *кв* без ухудшения эксплуатации.

Более высокие значения напряжения нельзя получить при имеющихся источниках постоянного напряжения. Из прежних опытов с выпрямлением тока вытекает, что искровой разрядник с воздушным дутьем может быть использован без значительного повышения давления вплоть до обратного напряжения 50 *кв*. При использовании избыточного давления в несколько атмосфер запирающая способность искрового разрядника составляет около 100 *кв*. Далее при опытах работали с током до

550 *а*; оказалось, что и относительно тока граница применения лежит очень высоко. Выпрямители с дугой высокого давления изготовлены средней продолжительной мощностью 150 *Мвт*. По результатам опытов нужно отметить следующие особо важные выводы.

Штифтовой электрод *С* может выступать из кольцевого электрода *А* на 1—4 *мм* без ухудшения условий эксплуатации искрового разрядника. Это удобно и обеспечивает длительный срок службы искрового разрядника. Во время эксплуатации электрод, естественно, обгорает и необходим некоторый запас материала электрода. Без регулирования электрода возможна, например, полностью безупречная непрерывная работа в течение 90 *ч* при импульсной мощности до 1 *Мвт*, обратном напряжении 16 *кв*, длительности импульса 0,7 *мксек* и частоте 1 500 импульсов в 1 *сек*. После 100 *ч* эксплуатации необходимо выдвинуть штифтовой электрод *С* на несколько миллиметров; это можно произвести без перерыва в эксплуатации. Кольцевой электрод *В* имеет срок службы около 500 *ч* при мощности 1 *Мвт*. После этого времени нужно сменить кольцевую вставку электрода, что производится очень просто. Можно конструировать импульсные искровые разрядники и для бо́льших мощностей и сроков эксплуатации; тогда штифтовому электроду нужно увеличить диаметр. При этом требуется повышенное потребление воздуха.

Количество воздуха, необходимое для обычного искрового разрядника, составляет 20—30 *м*^{3}/*ч*. Падение давления в искровом разряднике составляет около 0,1 *ат*, поэтому достаточен небольшой воздушный компрессор. Применение воздушного компрессора позволяет применять эти искровые разрядники в самолетах на бо́льшой высоте. Там, вследствие пониженного давления воздуха без специальных мероприятий невозможна эксплуатация. В этом случае нужно работать с замкнутой циркуляцией газа или отбирать некоторое количество воздуха от компрессора авиационного мотора.

Дальнейшие исследования оптимальных размеров электродов, расхода воздуха при очень больших мощностях, работы с замкнутой циркуляцией газа, обгорания электродов из различных материалов и в разных газах дали основы для конструирования манипуляторов на напряжения до 100 *кв* при мощностях до 20 *Мвт*, числе

импульсов 50—5 000 в 1 *сек* и длительностях импульса 0,1—1 *мксек*.

В заключение коротко расскажем об опытах с вращающимся искровым разрядником, который уже в 1942 г. в США использовали для генерирования импульсов в радиолокационных приборах. Вращающийся диск, несущий четыре штифтовых электрода, находится против неподвижного диска с одним или четырьмя закрепленными штифтовыми электродами. При скорости вращения двигателя 6 000 *об/мин* можно получить 400 или 1 600 импульсов в 1 *сек*. Вращающиеся электроды расположены на окружности диаметром 134 *мм*. Вблизи каждого неподвижного электрода расположено острие для предварительной ионизации. Расстояние от этого острия до вращающихся электродов должно быть выбрано таким, чтобы каждый раз при приближении движущегося электрода к неподвижному происходил разряд на острие, который ионизирует путь главного пробоя. Опыты с подобным искровым разрядником показали, что предварительная ионизация действует очень эффективно.

Безупречная работа с низким разбросом возможна только при точной установке заостренных электродов. Разброс начала пробоя при работе в атмосферном воздухе и 3 000 *об/мин* составляет все же около 5 *мксек*. Американский искровой разрядник назначается для встраивания в резервуар, в котором с помощью ручного воздушного насоса давление доводится до 2—3 *ат*. При работе под давлением разброс момента может быть уменьшен. Правда, очень сомнительно, можно ли его уменьшить до требуемого для надежного импульсного искрового разряда значения 10^{-7} *сек*. Поэтому вращающиеся импульсные искровые разрядники применяются для приборов ориентирования или панорамных приборов, у которых можно примириться с увеличенным разбросом момента зажигания.

Обобщая, можно установить, что с импульсными искровыми разрядниками Маркса можно выполнить все требования, которые возникают при эксплуатации передатчиков даже больших мощностей.

С вращающимися искровыми разрядниками получаются такие же чистые импульсы высокого напряжения; однако при их применении нужно принимать разброс начала разряда 5 *мксек*.

5. ПОДЖИГАЮЩИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

К специальному типу импульсных трансформаторов принадлежат трансформаторы, предназначенные для генерирования искры зажигания в двигателях внутреннего сгорания [Л. 17]. Точно приспособить их к условиям работы нельзя, однако можно упомянуть как о постановке задачи, чтобы, с одной стороны, при очень сильно за-

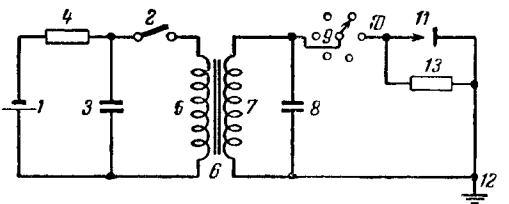


Рис. 63. Принципиальная схема устройства зажигания двигателей внутреннего сгорания с трансформированием разрядов конденсаторов (по Альтрогге—Фрюнгелю).

копченных свечах зажигания, соответствующих омической нагрузке около 1 000 *ом*, напряжение еще не очень сильно упало, а с другой—чтобы при проскакивании искры, несмотря на снижение сопротивления до нескольких ом, существенная часть накопленной в конденсаторе энергии выделялась в искре как тепловая энергия. Для этого используют принципиальную схему по рис. 63. Источник тока *1* напряжением 300 *в*, который при некоторых ухищрениях может быть заменен индукционным импульсом из низковольтного устройства, включается действующим подобно самому обычному прерывателю контактом *2*, который связан с движением двигателя внутреннего сгорания, как прерыватель. Основной конденсатор *3* так быстро заряжается от источника напряжения *1* через сопротивление или дроссель *4*, что обеспечивает при 200 зажиганиях в 1 *сек* шестицилиндрового двигателя достаточное напряжение заряда. При каждом замыкании контакта поджигающего механизма *2* конденсатор *3* разряжается через первичную катушку *5* специального маленького импульсного трансформатора с железным

сердечником *6* стержневой формы из листового железа. Вместо него можно применить ферритный сердечник. Если первичное напряжение около 300 *в* соответственно выбранному коэффициенту трансформации приложено к четырем виткам, что дает 75 *в* на виток, то на вторичной обмотке *7* с числом витков 200 возникает амплитуда напряжения 15 *кв*. Этим напряжением заряжается вспомогательный конденсатор *8*. При этом его величина выбрана так, чтобы накопленная в нем энергия составляла 50% энергии, накопленной в конденсаторе *3*. Обычный автомобильный распределитель *9* своими контактными элементами *10* подводит напряжение к отдельным свечам *11*. К корпусу двигателя *12* присоединена наружной резьбой свеча зажигания. Так как в обычных распределителях контакты не соприкасаются, а перемещаются на малом расстоянии, прямого закорачивания конденсатора *8* никогда не происходит. Сначала при напряжении заряда в несколько киловольт искра перекрывает зазор между движущимся пальцем *9* и неподвижным контактом *10*. Если параллельно искровому разряднику *11* и автомобильной свече зажигания имеется паразитное сопротивление *13*, то пока оно больше, чем апериодическое граничное сопротивление разрядного контура, состоящего из конденсатора *8* и индуктивности проводов, к нему приложено полное напряжение. Только если сопротивление очень мало, напряжение недопустимо падает.

Пример

Конденсатор *3* имеет емкость 1 *мкф* при напряжении заряда 300 *в*, что соответствует энергии 45 *мвт·сек*. Тогда конденсатор *8* при напряжении заряда 15 *кв* и половинной энергии должен иметь величину 100 *пф*. Индуктивность проводов составляет около 1 *мкгн*. Отсюда апериодическое граничное сопротивление разрядного контура, состоящего из емкости конденсатора 100 *пф* и этой индуктивности,

$$R = \sqrt{\frac{4L}{C}} = 200 \text{ ом}.$$

Видно, что сопротивление больше 200 *ом*, например 1 000 *ом*, соответствующее сильному обугливанию, полностью безопасно для амплитуды напряжения, так что на свече зажигания всегда имеется полное напряжение, даже при плохом состоянии ее. При искровом пробое в свече разряд протекает апериодически, так как искровое сопротивление составляет около 500 *ом*. (По формуле Теплера,

которая, правда, здесь только ограниченно применима, при длине искры 0,6 *мм*, давлении 8 *ат* искровое сопротивление равно

$$R_F = \frac{kLp}{CU} = \left(\frac{0{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}5 \cdot 8}{10^{-10} \cdot 15 \cdot 10^3} \approx 500 \text{ ом.}\right)$$

Искровое сопротивление 500 *ом* не очень отличается от апериодического граничного сопротивления 200 *ом*. При таком хорошем согласовании сопротивлений искровое сопротивление является наверняка самым существенным сопротивлением потребителя и обеспечивает высокий к. п. д. такого поджигающего устройства. Подобные устройства, как установлено Альтроггом и автором, в самом деле очень эффективны; горючее может иметь почти любые загрязнения и свечи зажигания могут иметь любые тепловые показатели Во всех случаях устройство дает абсолютно надежные искры, причем вследствие высокого содержания энергии и высокой амплитуды мощности (15 *кв* при 500 *ом*; $N_{\text{ампл}} = \frac{U^2}{R} = \frac{225 \cdot 10^6}{500} = 450$ *квт*!) дополнительно возникает ультразвуковой эффект, который, возможно, оказывает каталитическое действие на ускорение первого импульса зажигания.

6. ИМПУЛЬСЫ НАПРЯЖЕНИЯ В ОБШИРНЫХ ПРОВОДЯЩИХ СИСТЕМАХ

В заключение будет рассмотрено применение разрядов конденсаторов для получения импульсов напряжения, а именно так называемые установки заграждения. Их назначение при физиологически безвредном для здоровья действии на людей или животных безопасными импульсами напряжения вызывать испуг при прикосновении к заграждению. Чаще всего эти аппараты используют питание энергией, запасенной в индуктивности, связанной с прерывателем Вагнера (молоточковым прерывателем). При разрыве тока каждый раз освобождается энергия, равная $1/2\ LI^2$, где L — самоиндукция катушки; I — протекающий по ней ток. Чаще всего возникающий при этом импульс напряжения трансформируется по способу искрового индуктора Румкорфа и подается на ограждение.

Другой вид этих приборов работает с разрядом конденсатора. Обоим способам присущ существенный недостаток, а именно: нужно сделать импульсы такими сильными, чтобы даже при значительной утечке, например при влажных изоляторах, получить еще достаточно большое напряжение на проволоке. Однако при этом

энергия импульса должна быть такой высокой, что трудно надежно обеспечить, например, одной сухой батареей заграждение в течение целого лета. Многие конструкции генерируют острый импульс, не принимая во внимание, что только определенной длительностью протекания тока достигается оптимальный физиологический эффект. Достаточно совсем малого количества энергии в импульсе, если длительность его так подобрана, что она

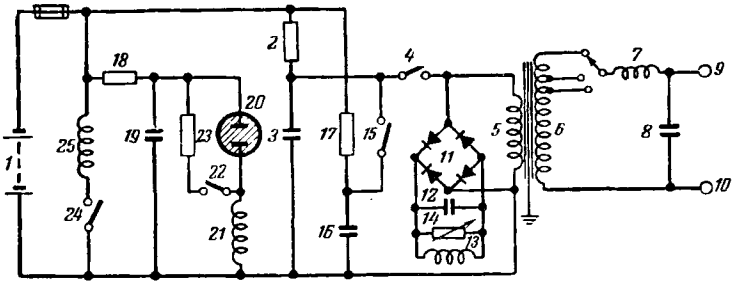


Рис. 64. Импульсный контур для медленно возрастающего миллисекундного импульса в длинных проводах (защитная электрифицированная изгородь для скота) с трансформированными разрядами конденсатора и автоматическим переключением в зависимости от *RC*-нагрузки.

является действительно физиологически оптимальной. Но средняя энергия может быть еще значительно снижена, если импульсную мощность, необходимую при влажных изоляторах, применяют не все время, а определяют по зависящей от погоды нагрузке изгороди. Чтобы этого добиться, автоматически изменяют количество накопленной энергии в конденсаторе, питающем импульсный трансформатор, в соответствии с нагрузкой изгороди. В простейшем случае достигают изменения энергии подключением дополнительного конденсатора при возрастающей нагрузке. Соответствующая схема представлена на рис. 64. Батарея *1* питает импульсатор и через сопротивление *2* заряжает конденсатор *3*. Механизм, управляющий контактами, периодически, например 1 раз в секунду, замыкает контакт *4*. При каждом включении этого контакта конденсатор *3* разряжается через контакт *4* на первичную обмотку трансформатора *5*. Вторичная обмотка *6* этого трансформатора через фильтр *7—8* под-

ключена к клеммам изгороди *9* и *10*. Благодаря очень прочной связи между обмотками *5* и *6* трансформатора гарантируется почти идентичная форма кривой на первичной и вторичной обмотках. Для достижения оптимального физиологического действия дополнительный конденсатор должен иметь такую величину, чтобы в соединении с основным конденсатором и первичной обмоткой трансформатора частота разряда была 250 *гц*, что хорошо действует на людей и животных. Доказано, что на всех млекопитающих сопоставимой величины оптимально действует одинаковая частота, так как чувствительная нервная система людей и млекопитающих построена идентично («провод одинаковой длины»). Небольшая часть тока, поступающего на первичную обмотку *5*, может отбираться через выпрямитель *11* и подводиться к реле; целесообразно, таким образом, что выпрямитель *11* питает конденсатор *12*, который подключен на обмотку *13* включающего реле, зашунтированную регулируемым сопротивлением *14*. Если ток, поступающий при каждом импульсе на обмотку *5*, не уменьшается, то реле с обмоткой *13* реагирует и от постоянно действующих импульсов непрерывно или периодически поддерживается в притянутом состоянии; при этом нормально замкнутый контакт постоянно разомкнут. При недостаточной внешней нагрузке или очень хорошо изолированной изгороди колебания, возникающие при разряде конденсатора *3* на обмотку *5*, носят периодический характер и при выпрямлении сильных пульсаций в конденсатор *12* поступает очень большое количество электричества. Так как количество электричества *It* идентично заряду конденсатора *CU*, напряжение *U* будет достаточно велико, чтобы постоянно питать обмотку *13* достаточным напряжением. Однако при возрастающей нагрузке колебания все больше и больше демпфируются и могут становиться даже апериодическими и количества электричества *It* уже недостаточно, чтобы подвести к обмотке *13* достаточно высокое напряжение. В этом случае реле отпускается со своим нормально замкнутым контактом *15*. При выключенном реле этот контакт подключает конденсатор *16*, заряжаемый через сопротивление *17* от того же источника тока параллельно конденсатору *3*. Конденсатор *16* может иметь, например, 10-кратную величину, так что количество электричества в возникающем теперь им-

пульсе увеличивается в 10 раз. Выбором величины этого конденсатора можно добиться того, что вследствие увеличения намагничивания железного сердечника трансформатора 5/6 и соответственного снижения его индуктивности можно получить почти такую же частоту, какую дает конденсатор *3* в соединении с обмоткой *5* при прохождении слабых импульсов. Таким образом, в случае необходимости и при подключенном конденсаторе *16* можно работать всегда еще вблизи физиологически оптимальной частоты.

Вспомогательное устройство для периодического управления импульсатором описано ниже. Конденсатор *19* заряжается через сопротивление *18* таким образом, чтобы постоянная времени зарядки составляла около 1 *сек* или другое требуемое время. Как только напряжение на конденсаторе *19* достигнет напряжения зажигания тлеющего разрядника *20*, он зажигается и часть электричества протекает через обмотку *21* вспомогательного реле. Если реле *21*, используя контакт *22*, замыкает накоротко сопротивлением *23* газовый разрядник, то получают полный разряд конденсатора *19* через обмотку реле. Количество энергии, подаваемое на обмотку, вследствие этого сильно возрастает, но так как разрядник *20* гаснет при напряжении тушения, полный разряд конденсатора *19* становится невозможным. Опытом установлен коэффициент около 10. В соответствии с этим достаточна десятая часть обычно требуемой величины конденсатора *19*, что означает экономию тока, особенно желательную при работе от батареи. Второй контакт *24* реле *21* периодически включает обмотку *25* защитного включателя, например ртутного. Контакт *4* можно связать с обмоткой *25* реле.

Для того чтобы уменьшить радиопомехи, возникающие при включении протяженных систем проводов, подобных антеннам, так конструируют трансформатор с определенным расположением первичной и вторичной обмоток, например с уменьшением емкостной связи, что неизбежные резкие разрядные импульсы в первичной обмотке передаются во вторичный контур без дополнительных гармоник с частотой свыше 10 *кгц*. Для этого используют объемное разделение первичной и вторичной обмоток. Обычная динамная сталь, особенно дешевых сортов, не передает мешающих колебаний высокой ча-

стоты из-за своих собственных потерь. Также можно подключить дополнительно индуктивно-емкостные фильтры, с тем чтобы преимущественно пропустить частоту ниже 10 *кгц*. Вместо релейного включения часто используют ионные реле тлеющего разряда с холодным катодом или лампы тлеющего разряда, а также мультивибраторные схемы на транзисторах, так как они потребляют напряжение менее 10 *в* и позволяют изготовить очень простые приборы с батарейным питанием.

7. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ПОСРЕДСТВОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРОВ

Промышленность ставит задачу передавать импульсы напряжения большой крутизны, полученные с помощью импульсных трансформаторов, по длинным воздушным проводам. При этом используют импульсы длительностью 1—4 *мксек* с напряжением 20—30 *кв* с волновым сопротивлением воздушных проводов около 300 *ом*. Необходимо использовать частоту следования импульсов, совершенно отличную от 50 *гц*, чтобы не возникало явление затягивания. Хорошо подходят неправильные частоты между 127 и 154 *гц*, но нужно строго избегать гармонических частот, например 150 *гц*. На распределительном пункте на каждый провод включают частоту, отличающуюся на несколько герц, так что отдельные импульсы никогда не совпадают. Генерируемые импульсы распространяются вдоль провода. Они не поглощаются в трансформаторах на концах провода, так как на всех сетях высокого напряжения применяют обычно входные дроссели, которые вследствие своей высокой индуктивности препятствуют переходу импульса в трансформатор. Таким образом, импульс доходит до другого конца воздушного провода, где расположен дроссель, и возвращается вследствие отражения. Одновременно часть импульса ответвляется в кабель задержки, в котором время прохождения импульса такое же, как и в воздушной линии. Импульс, возвращающийся по неповрежденной линии, совпадает по времени с сигналом, который проходит через кабель задержки. Оба сигнала подводятся к так называемому гексоду совпадений, т. е. подаются на первую и третью сетки лампы (Telefunken EH 900). Если оба импульса подходят одновременно и с задан-

ной амплитудой, то возникает анодный ток и приводит в действие мультивибратор, который замыкает реле анодной цепи [Л. 18]. Однако если вследствие нарушений в проводе импульс отсутствует, то отсутствует и соответствующий сигнал на гексоде совпадений и в результате мультивибратор отпускает реле и вследствие этого отключается провод. Мощным конденсатором можно вызвать вспомогательный разряд через искровой разрядник на один из трех проводов воздушной линии, который бежит вдоль провода к другому концу и там через фильтр низкой частоты и последовательно включенный выпрямитель приводит в действие реле. Таким образом, это реле действует от энергии пакета бегущей волны и не требует никакого вспомогательного провода. Оно со своей стороны выключает соответствующий центральный выключатель на другом распределительном пункте воздушной линии и, таким образом, отключает провод с обеих сторон.

Нарушение совпадения происходит, например, тогда, когда между двумя проводами воздушной линии горит дуга. Это настолько ощутимое нарушение волнового сопротивления, связанное с тем, что сопротивление дуги имеет величину 2—30 *ом* против 300 *ом* полного кажущегося сопротивления такого воздушного провода, что оно немедленно приводит к нарушению приема и отключает гексод совпадений. Поломки изоляторов и большое провисание воздушных проводов ведет также к значительному нарушению волнового сопротивления и принимаемых сигналов, так что при сильных изменениях геометрических форм надежно обеспечивается выключение. Конечно, обеспечивается немедленное выключение при коротком замыкании или обрыве проводов. Такую управляемую с задержкой времени опросную схему с трансформированным разрядом конденсатора высокой энергии и точно управляемой частотой следования, в случае необходимости можно дополнить широко применяемой схемой защиты по активной проводимости (Гамбургская электростанция совместно с фирмой Früngel).

Опросные импульсы должны иметь мощность несколько мегаватт, чтобы заглушить сильный «белый» шум при короне, а также при большом времени пробега и плохих условиях (сильный иней).

Схема с использованием гексода совпадений пред-

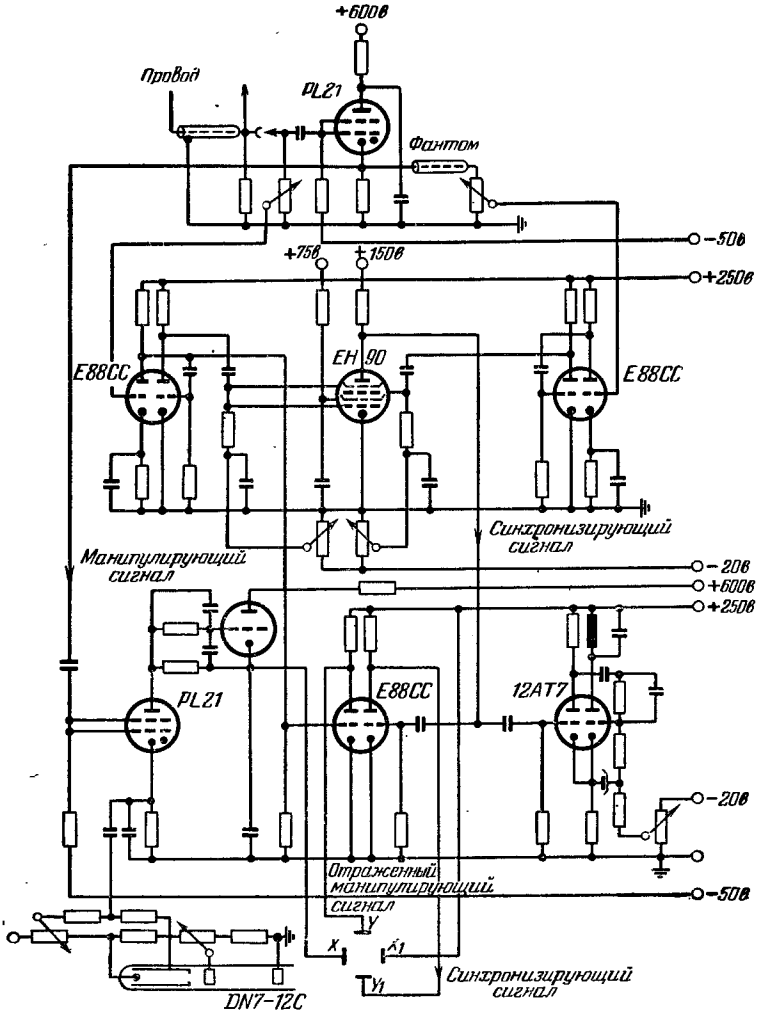


Рис. 65. Приемник совпадения импульсов с автоматическим запуском импульсной волны с крутым фронтом на длинные воздушные провода (рабочий контур Гамбургских электростанций, фирма Фрюнгель).

ставлена на рис. 65; сверху виден кабель задержки, обозначенный как «фантом», настроенный на время прохождения импульса при хорошем состоянии воздушных

проводов. Представленная схема оказывается пригодной для напряжений 110 и 220 *кв*, при которых передача энергии настолько значительна, что установка дополнительных защитных устройств экономически оправдана.

8. МОЛНИИ КАК РАЗРЯДЫ КОНДЕНСАТОРОВ

Следующие ниже данные базируются на обобщающем докладе Баатца (ETZ 1951, H.7) [Л. 19].

Измерение импульсов тока при ударах молний экспериментально затруднено, так как процесс нельзя вызвать по желанию. Из этого положения выходят, размещая небольшие намагничиваемые стержни в различных местах воздушных проводов и заземленной мачты. Токи молнии, протекающие по этим сооружениям, производят намагничивание, которое может быть сравнимо с подобным намагничиванием постоянным током или искусственным разрядом конденсатора. Большинство ударов молний имеет пик тока менее 40 000 *а*. Незначительное число молний имеет пик тока до 100 000 *а*, а в отдельных случаях наблюдают пики до 400 000 *а*.

Из суммы токов в общей картине распределения токов каждого удара молнии рассчитывают предположительные силы тока в канале молнии и из направления токов определяют полярность отведенного заряда облака. Все исследованные удары молнии распределены в табл. 3 по группам с разницей 10 *ка*. 87% молний возникает из отрицательных и 13% из положительно заряженных частей облаков. Бросается в глаза, что количество ударов молний из положительных частей облаков все время уменьшается, в то время как при ударах из отрицательно заряженных частей облаков число ударов молний возрастает при токах 10—20 *ка*, а затем уменьшается. Удары молний с током до 10 *ка*, возможно, бывают еще чаще, так как нижняя граница чувствительности стальных стержней на мачтах лежит около 2,5 *ка* и на заземляющих тросах около 1 *ка*. Вполне возможно, что пробои на мачты в линиях с заземляющим тросом при токах порядка 3 *ка* и ниже не отмечаются стальными измерительными стержнями. Если заземляющий трос не оборудован стальными стерженьками, то могут оказаться незамеченными перекрытия молнией заземляющего троса с током, приближающимся к 5 *ка*. Измерения, проведенные с помощью стержней, граница чувстви-

Таблица 3

Частота токов в канале молнии и полярность заряда облака

Ток, *ка*	Число токов молнии		
	Заряд облаков		Сумма
	положительный	отрицательный	
До 10	65	172	237
От 10 до 20	24	194	218
„ 20 „ 30	9	177	186
„ 30 „ 40	6	115	121
„ 40 „ 50	5	84	89
„ 50 „ 60	5	41	46
„ 60 „ 70	3	22	25
„ 70 „ 80	2	14	16
„ 80 „ 90	1	13	14
„ 90 „ 100	—	5	5
„ 100 „ 110	1	8	9
„ 110 „ 120	—	2	2
„ 120 „ 130	—	4	4
„ 130 „ 140	1	2	3
„ 140 „ 150	—	3	3
„ 150 „ 160	—	2	2
„ 160 „ 170	—	—	—
„ 170 „ 180	1	1	2
„ 400	1	—	1
Сумма,	124	859	983
%	13	87	100

тельности которых лежит около 0,5 *ка*, позволяют предполагать, что происходят удары молнии с незначительной величиной тока, которые не отражаются на проводах.

Если распределить токи молний по числу заземляющих тросов, то получится определенная зависимость, представленная на рис. 66. Так как число данных по линиям с тремя заземляющими тросами относительно мало, они объединены с данными при двух заземляющих тросах, тем более что нельзя обнаружить существенной разницы между ними. Из общего количества 77% токов — до 40 *ка*, 94% — до 70 *ка* и 97,4% — до 100 *ка*. Объяснения распределения величин токов в зависимости от числа заземляющих тросов до сих пор не найдено. Возможно, причину относительно малого числа результатов измерений в линиях без заземляющих тросов или

с двумя или тремя заземляющими тросами по сравнению с одним заземляющим тросом нужно искать в возрастании числа обнаруженных ударов с низкими значениями токов с увеличением числа заземляющих тросов. Возможно, что действуют и другие до сих пор еще неизвестные явления. Удивительно, что относительное число ударов молний из положительно заряженных облаков при

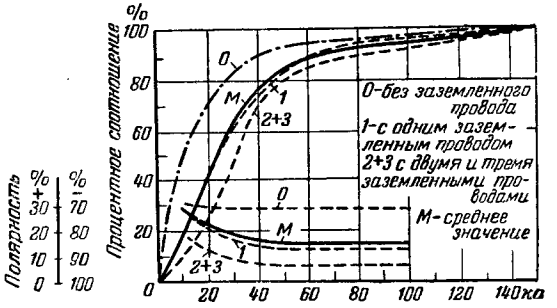


Рис. 66. Токи в разрядном канале молнии и полярность разрядов при ударе без заземляющего провода и с *1*, *2* и *3* заземляющими проводами.

малых токах значительно возрастает. При токах до 10 *ка* они составляют 27%, т. е. вдвое больше среднего значения. Поражает далее, что при увеличивающемся числе заземляющих тросов происходит сравнительно мало ударов молний из положительно заряженных частей облаков.

В 25 случаях (2,6%) установлены удары молний с токами свыше 100 *ка*. Самое высокое значение (400 *ка*) было установлено в 1937 г. с большой надежностью при положительной полярности заряда облака. Этот удар последовал после удара током 100 *ка* отрицательной полярности. Подобные большие токи в молниях крайне редки. В 1936 г. однажды предполагали ток 400 *ка* в молнии отрицательной полярности, последовавшей после молнии свыше 200 *ка* положительной полярности. Остальные 24 удара молнии лежат в области 100 - 180 *ка*.

Эти высокие значения токов грозовых разрядов объясняются тем, что облака часто могут иметь значительную емкость относительно земли. Облако, имеющее по-

верхность 1 *км*^{2} и расположенное на высоте 1 000 *м*, образует по расчету емкость относительно земли 10 000 *пф*. Так как напряжение заряда может быть принято максимально 50—100 млн. *в*, количество электричества составит

$$Q = CU = 0{,}5 \div 1{,}0 \ к.$$

При заряде 1 *к* и длительности тока 0,1 *мсек* ток должен быть 10 000 *а*. Так как площадь облаков часто может быть существенно больше 1 *км*^{2} и большинство отдельных молний объединяется в центральный разряд, высокие измеренные величины тока молнии можно считать правдоподобными. Из сравнения емкости облаков и измеренной длительности разряда можно сделать заключение о напряжении заряда облака, так как только при достаточно высоком напряжении физически возможно реализовать измеренное количество электричества в молнии. Следует производить измерения количества электричества при разряде молнии с одновременной оценкой емкости облаков, чтобы отсюда рассчитать статическое напряжение облака. Этим удается объяснить некоторые противоречия. Из приведенной выше таблицы, беря в основу надежно измеренную величину тока молнии 400 000 *а*, принимая емкость облака 0,1 *мкф* и длительность разряда 1 *мсек*, напряжение облака получим $4 \cdot 10^9$ *в*; при длительности разряда 100 *мксек* напряжение получается $4 \cdot 10^8$ *в*.

Использование емкости облаков и грозового разряда для получения импульса чрезвычайно высоких напряжения и тока применялось Брашем [Л. 31] для импульсных рентгеновских трубок. Он получил на Монте Ценери напряжение свыше 40 *Мв* на проводе, натянутом между горными вершинами.

9. КРУТИЗНА ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Импульсы напряжения очень большой крутизны получают с уже описанной в разд. Е,1 установкой импульсных напряжений Маркса. Если все искровые разрядники срабатывают в течение 0,2 *мксек* (что вполне достижимо), то при пике импульсного напряжения 10^6 *в* расчетная крутизна возрастания будет равна $5 \cdot 10^{12}$ *в/сек*. Эта величина станет более наглядной, если пересчитать ее на скорость света. При скорости распро-

странения $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек* это означает, что возрастание напряжения на 1 *см* длины провода составляет

$$\frac{5 \cdot 10^{12} \text{ в/сек}}{3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}} = 170 \text{ в/см}.$$

Еще более быстрое возрастание тока получают также по Марксу, размещая на пути переднего фронта волны напряжения искровой разрядник, как показано на рис. 67.

Допустим, что от конденсатора *1* через обычный искровой разрядник *2* с поджигающим электродом *3* про-

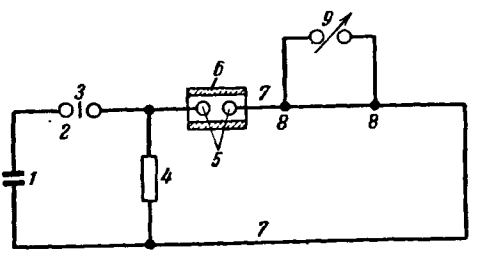


Рис. 67. Схема измерения крутизны напряжения по Марксу. (Цифры см. в тексте.)

ходит импульс напряжения на сопротивление *4*. Далее расположен специальный искровой разрядник, состоящий из двух шаров *5*, окруженных тесно прижатой к ним трубкой из твердого закаленного стекла *6*. Этот искровой разрядник в известном объеме стабилизирован стенками трубки *6*, так что искровой пробой наступает при чрезвычайно высоком перенапряжении между шарами *5*. Если теперь подключить в качестве потребителя систему проводов *7*, то крутизну напряжения в точках *8—8* можно измерить искровым разрядником *9*. Наибольшая измеренная до сих пор крутизна напряжения по этой схеме была 1 *кв/см*. Таким крутым передним фронтом можно возбуждать на антеннах сантиметровые волны. Вероятно, в первых опытах Гейнриха Герца работали с подобными крутыми волнами напряжения; его диполи, с которыми он проводил первые опыты передачи, были так сильно возбуждены, что на расстоянии многих метров из приемных антенн можно было легко извлекать

искры. Крутизна, которой должен был пользоваться Герц, равнялась 0,1—1 *кв/см*. Оригинальные работы Герца следовало бы пересчитать по современным нормам измерений, так как многие полученные в то время ре-

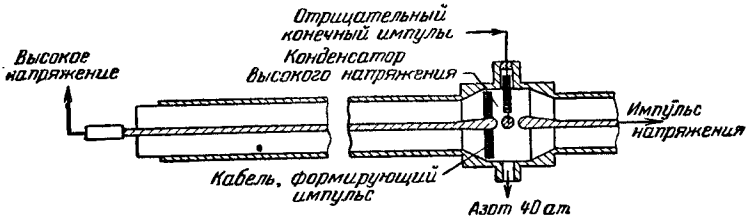


Рис. 68. Схема генератора импульсов с очень высокой крутизной мощностью 20 *квт* со временем возрастания $4 \cdot 10^{-10}$ *сек*. Коаксиальный конденсатор, который является носителем энергии, служит для того, чтобы поддерживать остроту амплитуды импульса.

зультаты не повторялись, а с точки зрения теории высоких напряжений они содержат интересные сведения.

Флетчер [Л. 20] получил пробой искрового разрядника в области 10^{-9} *сек*, т. е. тысячных долей микросекун-

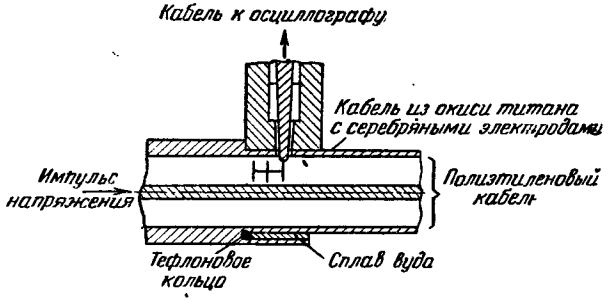


Рис. 69. Соединительный отрезок делителя напряжения для чрезвычайно крутых импульсов, состоящий из двух концентрично расположенных коаксиальных проводящих кабелей, характеристические полные сопротивления которых образуют отношение делителя напряжения 100 : 1.

ды, при нормальном атмосферном давлении. Он использовал для этого показанные на рис. 68 и 69 конструкции искровых разрядников, подобных описанному выше искровому разряднику Маркса.

На рис. 70 показан изготовленный в СССР [Л. 72] искровой разрядник импульсов высокого напряжения, который подобно искровым разрядникам Флетчера позволяет получать крутые импульсы напряжения, но, кроме того, благодаря своей конструкции допускает высо-

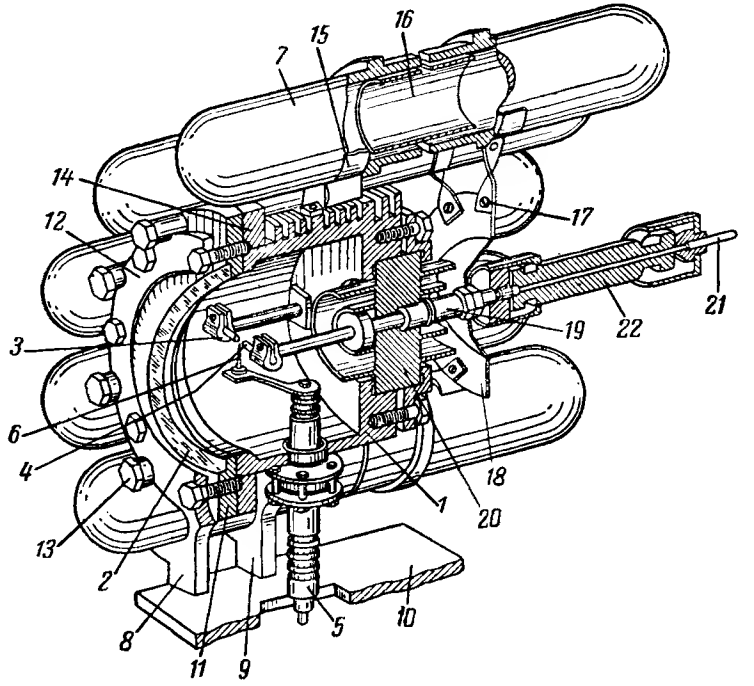


Рис. 70. Система искровых разрядников с керамическими конструкционными элементами и кварцевым полушаром для выхода излучения [Л. 72] (объяснение см. в тексте).

кую термическую нагрузку до 250 *вт*. Так как эта конструкция представляет технически изящное решение искрового разрядника для разрядов большой крутизны, она описана ниже. Разрядник представляет собой вариант лампы, уже ранее [Л. 6] предложенной автором.

На чертеже дана конструкция. Корпус лампы *1* представляет собой цилиндрический стакан (диаметром 160 *мм*) из латуни. Он имеет оребренную наружную по-

верхность для воздушного охлаждения. На передней стороне корпуса лампы укреплено кварцевое окно *2*, которое обеспечивает выход света под углом 120°. С задней стороны корпуса лампы расположена специальная оребренная труба *20* из тугоплавкой керамики, в которую плотно вмонтированы провода *19*, ведущие к вольфрамовому электроду *4*. Другой вольфрамовый электрод *3* искрового разрядника укреплен на днище корпуса лампы.

Через корпус лампы введена также свеча *5*, которая подает поджигающий импульс на электрод *6* для старта разряда. Независимо от этого вокруг лампового корпуса расположена короткая и широкая латунная шина *18* с керамическими горшочными конденсаторами *7*. Внутренние обкладки каждой пары конденсаторов связаны с латунной трубой *16*, которая снаружи одних конденсаторных групп соединена со скобами *15* и ведет к электроду *3* лампы, а в других группах через латунные шайбы *17* и проводящий канал *19* связана с электродом *4*. Во внешнем разрядном контуре имеются два последовательно включенных конденсатора, предусмотренные для самоопрокидывания системы. Каждый конденсатор имеет емкость 4 700 *пф*, всего 20 конденсаторов с общей емкостью 0,022 *мкф*. Индуктивность разрядного контура 0,6 *мкгн*.

Корпус лампы лапами *8* и *9* укреплен на плите *10*. Выходное окно *2* в виде кварцевой полусферы укреплено на корпусе лампы с помощью держателя *11*. Для уплотнения применяют медную фольгу толщиной 0,2 *мм*. Кварцевая полусфера и держатели стянуты через асбестовую прокладку кольцом *12* и болтами, сделанными из инвара. Со своей стороны держатель укреплен на корпусе лампы стальными болтами *13* через кольцо *14*.

Аргон вводится в лампу из баллона через внутреннее отверстие центрального проводящего болта. Для изоляции газопровода *21* от центрального провода *19* вмонтирована труба *22*. Лампа допускает кратковременную работу с давлением до 10 *ат* и максимальным напряжением 4 *кв*. При длительной работе используется давление 2 *ат* при напряжении на электродах 28 *кв* и длине искры 7—10 *мм*.

Допускается работа длительностью 0,5—2 *ч* с напряжением 1—4 *кв* при форсированном воздушном охлаж-

дении. Длительность работы лампы зависит от загрязнения кварцевого окна пылью вольфрамовых электродов. Длительность вспышки света всегда ниже 1 *мксек* и имеет максимальную плотность света около 10^8 *сб* (*св/см*^{2}).

F. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ КОНДЕНСАТОРОВ В РЕНТГЕНОВСКИЕ ВСПЫШКИ

1. ГЕНЕРИРОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

При преобразовании конденсаторной энергии в рентгеновские лучи имеют дело с таким же к. п. д., как и при стационарном получении рентгеновских лучей. Коэффициент полезного действия примерно пропорционален $U^{3/2}$; одновременно при напряжении свыше примерно 200 *кв* наблюдается так называемый эффект Комптона, т. е. эмиссия рентгеновского излучения в одном предпочтительном направлении вместо излучения со сферической характеристикой. При каждом конденсаторном разряде через рентгеновскую трубку следует учитывать высокий к. п. д. и направленный пучок по эффекту Комптона; хороший к. п. д. быстро снижается при уменьшении напряжения. Поэтому эмиттируемый импульс рентгеновских лучей значительно короче, чем электрический разряд. Излучение при низком напряжении на трубке к тому же является мягким и не проникает через стенку трубки.

Рентгеновская трубка. Под рентгеновскими вспышками мы понимаем рентгеновские излучения, эмиттируемые трубкой, в которой с молниеносной быстротой проходят сильные разряды [Л. 21]. М. Штеенбек сообщил о разрядной трубке и способе получения интенсивных рентгеновских вспышек. Предложенная им газонаполненная рентгеновская импульсная трубка с ртутным анодом в дальнейшем была развита Мюленфордтом лучшим расположением конструктивных элементов. Исходя из конструкции этой трубки, он создал ряд новых типов. Проведенные на них наблюдения привели его к созданию высоковакуумных импульсных рентгеновских трубок. Импульсная трубка, созданная им до первого сообщения Слэк'а (Slack) [Л. 22] и Эрке (Ehrke) об аналогичном устройстве, состоит из стального ко-

жуха, отполированного внутри до зеркального блеска, на конце которого находится фарфоровый корпус с анодной штангой, несущей массивный вольфрамовый конус—острие, на другом конце — молибденовый катод, имеющий форму полого конуса с алюминиевым окном для выхода рентгеновских лучей. Присоединенным к трубке диффузионным насосом внутри трубки постоянно поддерживается высокий вакуум. Анод этой трубки (рис. 71) через искровой разрядник соединен с заряженным высоковольтным конденсатором. Зажигание происходит с помощью поджигающего трансформатора, создающего перенапряжение на искровом разряднике, так, чтобы произошел пробой и напряжение конденсатора поступило на импульсную трубку. Благодаря возникающему между анодом и катодом разряду с острия анода излучается очень интенсивная рентгеновская вспышка, которой при напряжении 100 *кв* на расстоянии 20 *см* от окна еще можно просветить железную пластину толщиной 4,5 *мм*.

Так как искровой разрядник, включающий рентгеновское излучение, соединен с трубкой последовательно, в нем теряется известная часть энергии конденсатора. Далее становится заметным, что поджигание не всегда происходит достаточно надежно даже при значительном перенапряжении и недостаточно четко по времени. Поэтому Слэк и Эрке встроили в импульсную трубку особый расположенный над катодом поджигающий электрод, на который подавали напряжение поджигающего трансформатора. Идея конусного анода для придания фокусному пятну формы конической поверхности и окружения анода кольцеобразным катодом была уже в 1934 г. осуществлена Таллером, только при этом катод выполнялся как катод накала.

В дальнейшем развитии этих работ была сконструирована импульсная трубка, схематический эскиз которой представлен в правой части рис. 71, с помощью которой изучалась проблема звука при искровом пробое. Катод *K*, имеющий форму полого конуса, расположен против анода *A*, который выполнен как массивный вольфрамовый конус и укреплен на фарфоровом изоляторе. Катод *K* несет стеклянное кольцо с дисковым поджигающим электродом *Z*. Между острыми внутренними краями катода *K* и поджигающего электрода *Z* устанавли-

вается малый зазор, который при исследовании звуковых волн имел ширину 0,1 *мм*.

Вакуумные уплотнения выполнены резиновыми кольцами. В качестве вакуумного насоса служит трехступенчатый ртутный диффузионный насос Лейбольда (мо-

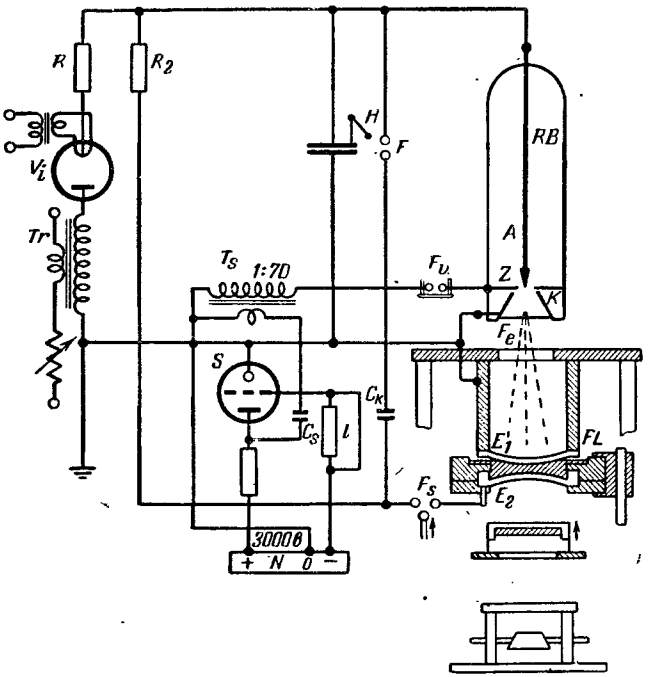


Рис. 71. Устройство рентгеновской импульсной трубки Шаафса со штифтовым анодом для просвечивания импульсами рентгеновского излучения. Вакуумная трубка *RB* поджигается импульсным трансформатором T_s через искровой разрядник F_v. Зона наблюдения расположена между E_1 и E_2.

дель *E*) с охлаждением жидким воздухом. Так как при сильном разряде порядка 10 000 *а* иногда из анода освобождается значительное количество газа, трубка должна быть подключена к мощному диффузионному насосу.

Электрическая схема. Эксплуатация происходит при напряжении до 100 *кв*. Безындукционный конденсатор

высокого напряжения C постоянно соединен с анодом импульсной трубки RB. Он заряжается от трансформатора Tr через вентильную лампу V_i и высокоомное сопротивление R. Напряжение конденсатора устанавливается на первичной стороне Tr, измерение напряжения производится искровым разрядником F.

Поджигание рентгеновской импульсной трубки происходит при подаче напряжения на поджигающий электрод Z. Это напряжение снимается с тиратронной установки. Процесс начинается механическим или электрическим уменьшением запирающего напряжения на сетке тиратрона S, ведущим к зажиганию тиратрона; вследствие этого конденсатор C_s, заряженный от сети N, разряжается через тиратрон S и первичную обмотку импульсного трансформатора T_s. Амплитуда напряжения на вторичной стороне достигает 10—20 *кв*, что и создает поджигающую искру.

Механизм разряда. Механизм разряда и возникновение рентгеновской вспышки можно описать следующим образом. Вначале между анодом A и катодом K имеется вакуумная изоляция, которая должна быть пробита в точно определенный момент времени. При напряжениях между анодом A и катодом K, равных 50—100 *кв*, и расстоянии между электродами 10 *мм* катодный градиент слишком мал, чтобы вызвать электростатическую электронную эмиссию [Л. 23]. Но если в межэлектродное пространство попадает несколько электронов, то они выбивают ионы из анода; ионы перемещаются к катоду и в свою очередь выбивают дополнительные электроны. Далее в освобождении электронов могут принять участие и фотоны.

При усиливающемся обмене электронами и ионами наступает пробой в высоком вакууме. Из-за огромной силы удар электронов при токе около 100 000 *а* возбуждает на аноде рентгеновское излучение и испаряет часть анодного материала [Л. 24—25]. Для того чтобы получить необходимые для этого пробоя первичные электроны, к узкому зазору с острыми краями между поджигающим электродом Z и катодом K подводится поджигающее напряжение 10—20 *кв*. При ширине зазора 0,1 *мм* и особой форме электродов достигается катодный градиент напряжения около 2 000 *кв/см*, возникает автоэлектронная эмиссия электронов и происходит про-

бой, вследствие которого образуются носители электричества, требующиеся для главного разряда.

Фокус. Кратчайший путь, который проходят электроны при полете к аноду, оканчивается на анодном острие. Хотя электроны попадают на весь анодный конус, наиболее жесткая компонента излучения идет с анодного острия. Снимки фокусных пятен в направлении главных лучей показали, что область интенсивного излучения ограничена диаметром 1 *мм*. Анод, выполненный в виде конуса, имеет, таким образом, весьма хороший анастигматизм.

Мощность и токовая нагрузка. Мощность импульсной рентгеновской трубки лучше всего обозначать толщиной стальной пластины, просвечиваемой одним отдельным импульсом. При анодном напряжении 100 *кв* можно просветить железную пластину толщиной 3 *мм* на расстоянии около 20 *см*. В непосредственной близости к трубке можно просветить железную пластину толщиной 10 *мм*. Однако отмечают, что интенсивность рентгеновского импульса колеблется по необъяснимым причинам, так что приведенные значения иногда могут быть значительно меньше, а в других случаях превосходить указанные цифры.

Среднее значение тока, проходящего при разряде, может быть оценено следующим образом. Общая длительность отдельной рентгеновской вспышки составляет около $2 \cdot 10^{-7}$ *сек*. В течение этого промежутка времени как ток, так и напряжение должны быть относительно большими. Конденсатор емкостью 0,1 *мкф* разряжается при этом от 100 примерно до 20 *кв*. Количество электричества при разряде

$$Q = \int_0^t i dt = C\Delta U;$$

для среднего тока i_m приблизительно получается

$$i_m = \frac{C\Delta U}{\Delta t}.$$

При этом для большей точности должно быть принято, что действительная длительность разряда в 2—3 раза больше, чем наблюдаемая длительность рентгенов-

ской вспышки. При подстановке числовых величин напряжение 100 *кв* дает среднее значение тока $i_m \approx 15\,000$ *а*; при напряжении 50 *кв* $i_m \approx 7\,500$ *а*. Но этот максимум тока получают не при полном напряжении, а, вероятно, при значении его ниже половины. Несмотря на очень

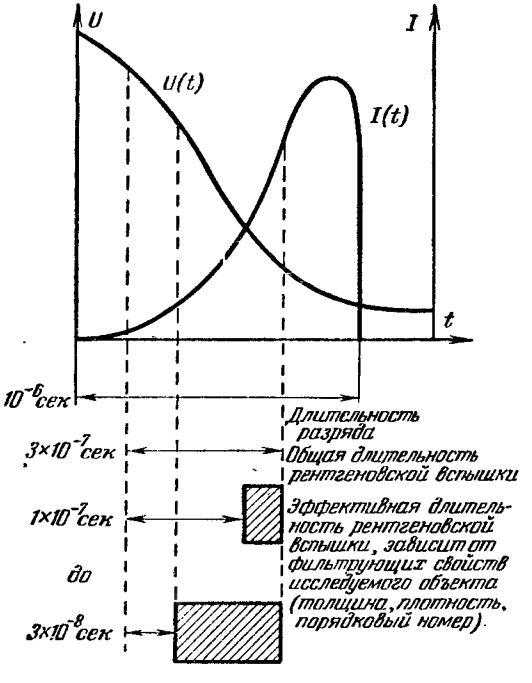


Рис. 72. Различие между длительностью разряда, общей длительностью рентгеновской вспышки и эффективной длительностью рентгеновского импульса.

сильные нагрузки, обычно эта конструкция выдерживает много тысяч импульсов при напряжениях от 60 до 100 *кв*.

Длительность рентгеновской вспышки. Для определения длительности рентгеновской вспышки на оси очень быстро вращающегося двигателя помещают алюминиевый диск диаметром 20 *см*, который имеет окна в двух противоположных местах вблизи края, с радиально на-

тянутыми танталовыми нитями толщиной 0,1 *мм*. Сравнение резкости изображений этих нитей на пленке в неподвижном и подвижном состояниях двигателя дает длительность рентгеновской вспышки около $2 \cdot 10^{-7}$ *сек*. Такому способу измерения присущ недостаток, лежащий в ограничении максимального числа оборотов двигателя. Он в лучшем случае дает возможность определить общую длительность излучения всех длин волн рентгеновской вспышки, в то время как действительно действующая длительность рентгеновской вспышки при просвечивании объектов зависит от абсорбции наиболее жесткого излучения. При описанном ниже просвечивании быстрых звуковых волн при напряжении 50—60 *кв* эффективная длительность импульса была получена

$$t_{\text{действ}} \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}.$$

Рис. 72 показывает различие между длительностью разряда, общей длительностью рентгеновской вспышки и эффективной длительностью рентгеновского импульса (по Шааффсу) [Л. 24].

2. РЕНТГЕНОВСКОЕ ПРОСВЕЧИВАНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Еще Мюленпфордт указал на возможность применения рентгеновских импульсных трубок для структурных исследований быстро движущихся динамически нагруженных деталей машин, в особенности процессов износа и разрушения высоко нагруженных зубчатых колес, изгиба и отрыва лопаток в быстровращающихся машинах, отрыва обмоток в электрических машинах[1].

В дальнейшем речь шла об исследовании материалов инструментов в работе, например при сверлении мягких металлов и камней, износа тормозов при чрезмерном давлении или сильном ударном нагружении (испытание прочности). Пример баллистических исследований дал Штеенбек.

Далее может быть интересным протекание во времени процессов литья, например литья под давлением в гипсовую или металлическую форму или центробежного литья. Зная этот процесс, можно предусмотреть

[1] Такое интересное исследование обмоток было проведено и дало результаты, отличающиеся от теоретически предсказанных.

последующее разрушение или возможность разрушения. Рис. 73 позволяет определить протекание во времени литья свинцового колеса в алюминиевую форму по фотографиям восьми последовательных фаз, сделанных Мюленпфордтом. В области физики взрывчатых веществ

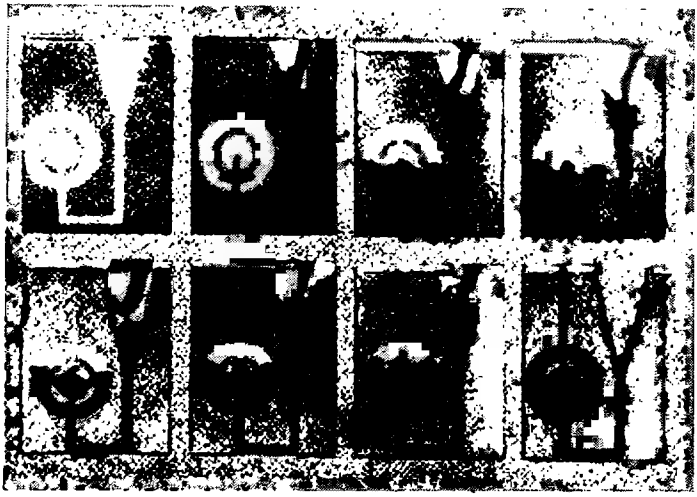


Рис. 73. Рентгеновская импульсная фотография литья свинцового колеса в алюминиевую форму; последовательная съемка восьми фаз.

техника рентгеновских импульсов неизбежна при изучении кумулятивных зарядов.

Если объект исследований слишком плотный и изготовлен из тяжелых металлов или если он имеет большие размеры и для получения четких фотографий нужно работать с фокусом на большом расстоянии, можно, как это уже было сделано Штеенбеком, при периодическом движении объекта синхронизировать с ним возбуждение рентгеновского импульса и окончить экспозицию после определенного числа рентгеновских импульсов [Л. 25].

3. РЕНТГЕНОВСКАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТРУБКА С ДВОЙНЫМ АНОДОМ ДЛЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ СНИМКОВ [Л. 26]

Вследствие чрезвычайной краткости рентгеновского импульса многочисленные быстрые процессы, недоступные для прямого визуального наблюдения или непо-

средственной импульсной фотографии, становятся доступными для исследования с применением конденсаторной импульсной техники для получения одновременно двух рентгеновских импульсов. Такой эффект может быть получен трубкой с двойным анодом.

4. КОНСТРУКЦИИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ТРУБКИ ДЛЯ ШИРОКИХ ПРЕДЕЛОВ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

На рис. 74 показано дальнейшее развитие конструкций рентгеновской импульсной трубки. Она состоит из железной камеры E, присоединенной штуцером с фланцем к масляному диффузионному насосу. Передняя сторона камеры вакуумплотно закрыта пластмассовым изолятором I через резиновое уплотняющее кольцо G; задняя сторона закрыта шайбой S из такой же пластмассы. Катод K — цилиндр диаметром 20 *мм* — непосредственно соединен с камерой E и землей. В центре катода находится изолированный от него поджигающий электрод Z. Зажигание трубки производится путем автоэлектронной эмиссии в кольцевой щели Sp шириной около 0,1 *мм*. Поджигающий электрод Z имеет емкостную связь с внешним контуром [Л. 27]. Диэлектриком связывающего конденсатора $C_к$ служит пластмасса закрывающей шайбы S. Против катода на высоковольтной стороне находится анод A, поверхность которого наклонена под углом 72° к оси трубки. Таким образом,

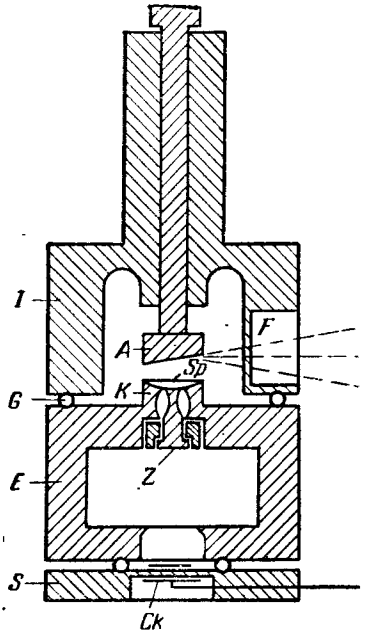


Рис. 74. Рентгеновская импульсная трубка со штриховым фокусом с боковым выходом луча. Анод имеет большую теплоемкость.

E — железный корпус; I — изолятор из пластмассы; G — резиновое уплотняющее кольцо; S — шайба из пластмассы; K — катод; Z — поджигающий электрод; A — анод; S_p — круглая щель; C_k — связывающий конденсатор; F — окно рентгеновского излучения.

главное излучение направлено перпендикулярно оси трубки; анод образует так называемый фокус Гетце. Изолятор из литой смолы [1] имеет в этом направлении выемку диаметром 30 *мм*, так что оставшийся слой смолы образует выходное окно *F* для рентгеновского излучения. Пропускающая способность этого окна относительно велика, так как пластмасса изготовлена преимущественно из элементов с низким порядковым номером. Свинцовая бленда на наружной стороне окна служит для защиты от возникающего в изоляторе излучения рассеяния. Ось рентгеновской трубки располагается горизонтально. Изолятор *I* с анодом можно удобно поворачивать около оси без открывания трубки так, чтобы рентгеновскому излучению можно было дать любое направление в зависимости от расположения фотографируемого объекта. Размеры рентгеновской импульсной трубки относительно малы; длина трубки 20 *см* и наружный диаметр 10 *см*. Поэтому путь разряда можно сделать очень коротким, что означает возможность сохранять индуктивность *L* достаточно малой. Разрядное пространство переведено из железной камеры *E* в изолятор *I*, для того чтобы устранить нежелательные разряды на стенки камеры. В установочной плите катода имеются длинные каналы, через которые разрядное пространство соединяется с насосом. Недостаток конструкции заключается в необходимости защиты свинцовыми стенками вокруг трубки для поглощения опасного излучения.

5. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ ИМПУЛЬСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

Для питания рентгеновской трубки служит импульсный генератор Маркса [Л. 28, 29] (рис. 75). Поджигание импульсного контура производится маленьким тиратронным аппаратом через щелевой разрядник F_Z. Число главных конденсаторов ($C_1 \ldots C_5$) можно изменять от 1 до 7, так что в зависимости от желаемой жесткости излучения на импульсную рентгеновскую трубку можно подавать импульсное напряжение от 20 до 140 *кв*. Если вакуум в импульсной рентгеновской трубке хороший, то импульсное напряжение недостаточно для того, чтобы

[1] Легуваль, аралдит или другие двухкомпонентные литые смолы.

возбудить разряд автоэлектронной эмиссией. Но это удается с помощью поджигающего электрода Z, если подать на него импульсное напряжение 40 или 20 *кв*. Сопротивление R_V перед поджигающим электродом рентгеновской трубки служит для того, чтобы поджигающая искра между электродом Z и катодом рентгеновской трубки проходила с некоторой задержкой, т. е. не-

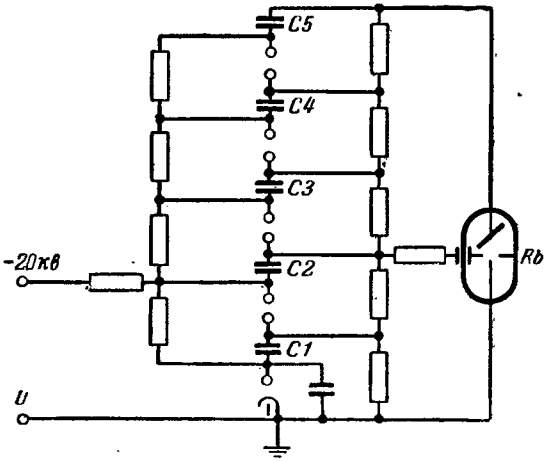


Рис. 75. Импульсная схема с рентгеновской импульсной трубкой (100 *кв*). Поджигающее напряжение снимается со второй ступени каскада из пяти конденсаторов.

C_1—C_5 — конденсаторы; *Rb* – рентгеновская импульсная трубка.

посредственно после приложения главного напряжения на главные электроды, что вызывает главный разряд. Схема представляет удобную комбинацию наружного запуска импульсного контура и внутреннего поджигания рентгеновской трубки. Так как в этой схеме отсутствует обычный большой предварительный искровой разрядник, можно сделать подводящую проводку такой короткой, что индуктивность импульсного контура с одним главным конденсатором C_1 (импульсное напряжение 20 *кв*) составляет только $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ *гн*, а при семи главных конденсаторах (импульсное напряжение 140 *кв*) $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ *гн*. Длительность рентгеновского импульса в этом устройстве может быть оценена лишь приблизи-

тельно. Для этого стальную проволоку диаметром 0,2 *мм* вращают двигателем с большим числом оборотов так, чтобы конец проволоки имел окружную скорость 210 *м/сек*. Этот вращающийся конец проволоки фотографируется совместно с неподвижной проволокой одинаковой толщины одним рентгеновским импульсом. Полученные фотографии можно сравнить. Таким образом, по снимку без труда можно оценить перемещение, соответствующее по времени 10^{-6} *сек*. Таким способом установлено, что длительность рентгеновской вспышки меньше 10^{-6} *сек*.

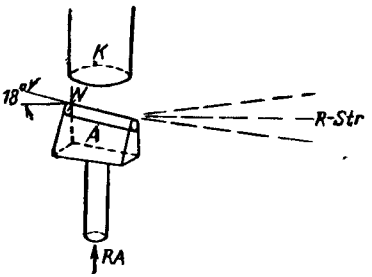


Рис. 76. Анод со штриховым фокусом в соответствии с рис. 74.

A — анод; *K* — катод; *W* — вольфрамовый штифт; *RA* — ось рентгеновской трубки; *R—Str* — рентгеновское излучение.

Устройство анода. Чтобы с помощью рентгеновского излучения получить резкое теневое изображение, всегда желательно иметь малое фокусное пятно. Это требование очень трудно выполнить при чрезвычайно большой нагрузке анода импульсной рентгеновской трубки.

Устройство фокуса Гетце дает возможность уменьшить распространение кажущегося фокусного пятна, по крайней мере в одном направлении. Держатель анода имеет форму крыши (рис. 76), но так, что «конек» наклонен под углом 18°. К этому «коньку» приварен вольфрамовый штифт *W* диаметром 1,5 *мм* и длиной 16 *мм*, образующий анод. Получаемое при этом рентгеновское излучение *R—Str* имеет направление, обусловленное «коньком».

Анод, наклоненный под углом 72° к оси *RA* рентгеновской трубки, образует фокус Гетце в направлении рентгеновского излучения. Подобным образом получают фокусное пятно диаметром около 2 *мм*.

Крышеподобный анод может быть выполнен двойным, так чтобы расстояние *a* (рис. 77) между обоими вольфрамовыми штифтами, т. е. между образующимися фокусными пятнами, составило 20 *мм*. Этот двойной анод расположен симметрично относительно цилиндри-

ческого катода. При разряде ток идет по обоим вольфрамовым стержням. Разница во времени возникновения обоих фокусных пятен меньше длительности рентгеновского импульса и в большинстве случаев не имеет значения.

Пример фотографирования с двойным анодом. Два фокусных пятна двойного анода позволяют получить практически одновременно два теневых изображения маленького предмета. Исходя из расстояний между изображениями и между фокусными пятнами в рентгеновской трубке и удаления фотопленки от рентгеновской трубки, можно затем восстановить положение предмета в момент съемки, как это обычно делается с использованием стереоснимков. С помощью подобного анода можно одновременно получить два фокусных пятна, расположенных на расстоянии 20 *мм* одно от другого. Расстояние между снятыми таким образом двумя теневыми изображениями предметов дает в дальнейшем масштаб для определения пространственного положения предмета в момент съемки. Кроме того, двойной анод дает возможность сравнивать различные анодные материалы. Из полученных результатов можно установить, что испарение анодного металла при разряде в импульсной рентгеновской трубке, вероятно, играет существенную роль.

Рис. 77. Двойной анод для излучения со штриховым фокусом (по Елле).

Описанную выше конструкцию импульсной рентгеновской трубки можно применять как для излучения отдельных импульсов, так и в периодической эксплуатации в меру общей теплоемкости анода. Не разрешается, с одной стороны, доводить температуру до оплавления или интенсивного испарения вольфрама, с другой — допускается лишь такая мощность отдельного импульса, за время которого не успевает произойти отвод тепла в материал анода и происходит только небольшое испарение поверхности анода.

За время каждой серии импульсов заметно постепенное уменьшение интенсивности рентгеновского излучения вследствие поглощения излучения осевшим на окно испарившимся вольфрамом. Если, например, допу-

скаемая энергия при одном разряде в трубке составляет 2 500 *дж* (100 *кв*, 0,5 *мкф*), то можно также произвести серию из 100 отдельных быстро следующих друг за другом разрядных импульсов, каждый из которых содержит 1% общей энергии, т. е. разряжать конденсатор емкостью 5 000 *пф* при напряжении 100 *кв* (рис. 78). В этом случае целесообразно применить импульсный

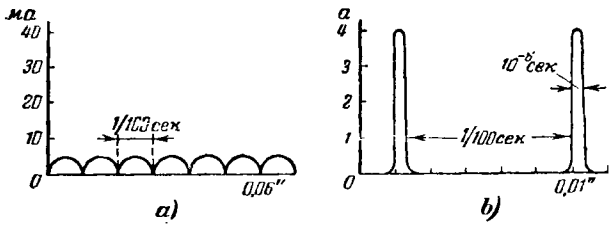


Рис. 78. Схема нагрузки трубок при эксплуатации с импульсным трансформатором (Фогель—Фрюнгель).
а — нагрузка при обычном нефильтрованном выпрямлении с частотой 100 полупериодов в 1 *сек*; *б* — тот же вид нагрузки с импульсами, равными по энергии, и частотой 100 импульсов в 1 *сек*.

трансформатор с периодическим управлением первичным напряжением, который описан в разд. Е. Также можно возбуждать импульсы с помощью гасящего искрового разрядника или искрового разрядника с воздушным дутьем и получать чрезвычайно быстрые серии импульсов с частотой следования 1 000—50 000 *гц* в пределах термической допустимости. Если используют 16-милиметровую пленку при обычной скорости съемки 16 кадров в 1 *сек* и нужно получить хорошо рассматриваемую серию снимков процесса продолжительностью 3 *сек*, т. е. 50 кадров, то видно, что необходимо получить серию из 50 рентгеновских импульсов с произвольной скоростью для наблюдения очень быстро протекающего процесса движения; при этом пленку передвигают с помощью барабанной камеры. Барабанная камера с расположенной на поверхности пленкой, на которую через пластмассовое окно прямо попадает рентгеновское излучение, позволяет создать скорость перемещения пленки до 100 *м/сек**. Если при этом высота кадра равна

* Strobodrum фирмы Früngel.

10 *мм* при ширине обычной негативной пленки 35 *мм* (неперфорированная — 35 *мм*, перфорированная — 24 *мм*), то при скорости 10 000 кадров в 1 *сек* и длине пленки 1,5 *м* можно произвести непосредственно один за другим 150 рентгеновских импульсов. В то время как статическое рентгеновское излучение все больше и больше заменяется другими процессами, такими, как ней-

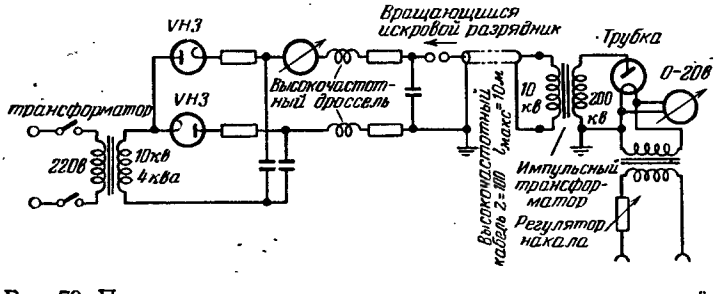


Рис. 79. Простая эксплуатационная схема рентгеновского устройства с импульсным трансформатором (по Фрюнгелю—Фогелю).

тронное или гамма-просвечивание, рентгеновскую стробоскопию серией рентгеновских импульсов, так же как и отдельные рентгеновские импульсные снимки, нельзя заменить препаратом из изотопов или чем-либо подобным.

Методы рентгеновских исследований могут развиваться. На рис. 80 показана барабанная камера с расположенной на ее поверхности пленкой, камера имеет свинцовую защитную маску по размеру кадра и предназначена для серии рентгеновских импульсов.

Кроме описанных выше устройств, для получения рентгеновских импульсов повсюду работают разрядом конденсатора прямым способом, т. е. разрядом прямо на рентгеновскую трубку; сочетание импульсного трансформатора с рентгеновской трубкой допускает более свободный выбор частоты импульсов.

Рентгеновские вспышки с очень высокими напряжениями энергии, проходящей при разряде, получал Браш [Л. 31]. Вначале для проникновения в область многих мегавольт он натянул как антенну на Монте Дженерозо (Швейцария) трос, воспринимающий грозовые разряды, который был изолирован фарфоро-

выми изоляторами, а затем пеньковыми канатами. Он получал при грозах 12-15 *Мв*. Конструкция его импульсной рентгеновской трубки была сравнительно простой; он применял сегментообразную трубку с антикатодом и производил симметрирование напряжения по длине трубки металлическими и картонными шайбами подобно гасящему искровому разряднику. Трудности с вакуумом обойдены подключением трубки одновременно с холодильной ловушкой к мощному насосу. Высокое напряжение прикладывалось к трубке только во время импульса через шаровой искровой разрядник.

Благодаря этому пробивное напряжение трубки может лежать ниже применяемого рабочего напряжения. После опытов с «атмосферными конденсаторами» в форме разряда молнии Браш перешел к генераторам импульсного напряжения Маркса на напряжение 2,4 *Мв*. Полученные рентгеновские импульсы позволяли просвечивать свинец толщиной 20 *см*. Импульсный генератор имел 12 конденсаторов, каждый по 48 000 *пф*, совместно 4 000 *пф* при 2,4 *Мв*: отсюда — накопленная энергия около 12 000 *дж*; длительность разряда лежала между 10^{-4} и 10^{-6} *сек*. Вместо антикатода он поместил выходное окно для выхода электронов в воздух. Кратерное действие быстрых электронов на металл и явление флуоресценции подвергались изучению. Некоторые металлы, например латунь, склонны к образованию пузырей.

Целлон вследствие образующихся статических зарядов многократно пробивается быстрыми электронами. Использование атмосферных разрядов из-за колеблющегося во времени образования грозы приводит к значительной растрате времени на опыт.

Все указанные схемы имеют тот общий недостаток, что рентгеновская трубка имеет очень ограниченную стабильность напряжения. Как пример можно указать, что обычная терапия остается при относительно низких напряжениях трубок 180–200 *кв* и в некоторых случаях из соображений обеспечения стабильности напряжения возвращается к 160 *кв*. Это тем более прискорбно, что выход энергии рентгеновской трубки (*р/мин* — мощность дозы) пропорционален более чем полуторному потенциалу на трубке. Повышение напряже-

ния на трубке со 100 до 200 *кв* дает более чем тройную мощность дозы.

Резюмируя, можно указать на следующие недостатки существовавших способов:

1. Большие размеры и объем всех составляющих частей.

2. Дорогой высоковольтный кабель при пространственном отделении источника высокого напряжения от рентгеновской трубки.

3. Ограниченная надежность напряжения рентгеновской трубки.

Эти недостатки [Л. 8] уменьшаются описанным ниже способом, принцип которого и схема представлены на рис. 79.

От сети питается трансформатор, вторичное напряжение которого равно 10 *кв*. Это напряжение через конденсаторы и выпрямительные лампы подводится к накопительному и импульсному конденсатору. Электричество, накопленное в этом конденсаторе, периодически подводится через управляемый искровой разрядник или другое включающее средство к первичной обмотке импульсного трансформатора с разомкнутым железным сердечником, вторичная обмотка которого непосредственно связана с рентгеновской трубкой. Этот импульсный трансформатор имеет с первичной стороны 10 и со вторичной стороны 200 витков в каждом слое. Вес и величина погруженного в масло импульсного трансформатора соответствуют приблизительно современному обычному терапевтическому аппарату на 200 *кв*.

Если конденсатор разряжают через демпфирующую индуктивность, то возникают затухающие электрические колебания. Если конденсатор разряжают через сопротивление, то получают апериодический разряд. Оба случая соприкасаются в апериодическом граничном случае. Сопротивление нагрузки при апериодическом разряде должно удовлетворять формуле

$$R = \sqrt{\frac{4L}{C}},$$

где R — сопротивление нагрузки;
C — емкость;
L — индуктивность.

Этот граничный случай представляет собой кратчайший возможный переход энергии из одной формы в другую. В приведенной схеме имеется нагрузочное сопротивление рентгеновской трубки. Ее эксплуатационное сопротивление во время импульса соответствует

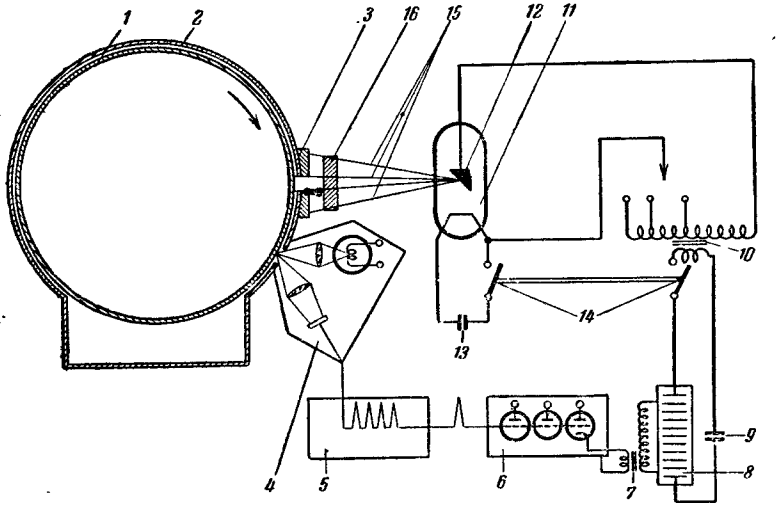


Рис. 80. Устройство для рентгеновских вспышек высокой частоты следования, синхронизированных с перфорацией рентгеновской пленки в барабанной камере (импульсный трансформатор с искрогасящим разрядником в первичном контуре). Стробоскопическая рентгеновская вставка фирмы Фрюнгель. Предназначена для:

а — синхронизированных вспышек с частотой до 5 000 вспышек в 1 *сек* для пленки стандартного формата; *b* — стабилизированных кварцем вспышек с частотой до 50 000 вспышек в 1 *сек* с маленькой диафрагмой. *1* — вращающийся пленочный барабан (стрободрум); *2* — корпус; *3* — задвигаемая свинцовая диафрагма по формату пленки; *4* — инфракрасный щуп перфорации пленки; *5* — делитель частоты 4 : 1 (синхрофот); *6* — управляющий прибор с несколькими водородными тиратронами; *7* — поджигающий импульсный трансформатор; *8* — искрогасящий разрядник; *9* — батарея полистироловых конденсаторов; *10* — импульсный трансформатор 100 : 500 *кв*; *11* — рентгеновская трубка; *12* — анод с высокой теплоемкостью; *13* — конденсатор для импульсного нагрева катода в течение около 0,01 *сек*; *14* — включатель для одновременного включения серии вспышек и импульсного нагрева трубки; *15* — направление лучей; *16* — объект.

приблизительно граничному апериодическому сопротивлению разрядного контура.

Накопленное в конденсаторе электричество при каждом из 1 000 импульсов в секунду превращается в импульс высокого напряжения, который создает ток,

определяемый эмиссией в рентгеновской трубке. Длительность импульса лежит в области микросекунд.

Выполненная конструкционная форма дает, например, при первичном напряжении 10 *кв* и емкости батарен 0,1 *мкф* вторичный импульс напряжением 200 *кв* длительностью 2 *мксек*. При этом важно подавить возникающее магнитное поле рассеяния, которое возникает вследствие ферромагнитного направления силового поля в импульсном трансформаторе и чрезвычайно малоиндуктивном выполнении всех остальных элементов схемы и подводящих проводов.

Так, полученный отдельный импульс дает по Фурье преимущественно высокие частоты 10^5—10^6 *гц*. Поэтому вследствие очень большой скорости изменения магнитного потока необходима только 0,01 числа витков обычного трансформатора, после того как уже значительно уменьшено сечение сердечника (см. разд. Е). Если в обычном для рентгеновской техники трансформаторе переменного тока промышленной частоты 50 *гц* индуцируемое во вторичной обмотке напряжение составляет 1—4 *в/виток*, то в импульсном трансформаторе оно составляет 500—1 000 *в/виток*. Этим объясняются очень малые объем и вес импульсного трансформатора по сравнению с обычным трансформатором переменного тока при одинаковой длительной мощности[1].

Дополнительное преимущество в описываемых здесь способах с импульсными трансформаторами представляет возможность регулирования напряжения на рентгеновской трубке путем переключения числа витков или изменением напряжения на конденсаторе, а также возможность заземления анода или катода в зависимости от удобства. Также можно питать накал от вторичной обмотки высоковольтного трансформатора, на которую наносятся дополнительные витки (экономия обычных накальных трансформаторов с высокой прочностью на пробой).

Количество и качество излучения устанавливаются известным в рентгенотерапии дозиметром, проверяемым контрольным прибором Кюнстлера. На двух опытных установках были получены следующие данные.

[1] В мощных импульсных трансформаторах доводят напряжение до 10 *кв/виток*.

Пример 1

Рентгеновская трубка: генераторная лампа RS329 (для напряжения 3 *кв*).

Общий фильтр: 0,75 *мм* Cu + 1 *мм* Al.

Число импульсов: 50 в 1 *сек*.

Длительность импульса: 2 *мксек*.

Половина значения просвечиваемой толщины: медь толщиной 0,8 *мм* (т. е. по качественной диаграмме напряжение на трубке составляет 135 *кв*).

Мощность дозы: 0,15 *р/мин* на расстоянии 50 *см* от фокуса. Эмпирические сравнительные значения при напряжении 135 *кв*, токе 1 *ма*, расстоянии от фокуса 50 *см* и фильтре из меди толщиной 0,75 *мм* + алюминий толщиной 1 *мм*:

на аппаратах Вилларда	0,6 *р/мин*
на аппаратах Грейнахера	1,4 *р/мин*

Несмотря на относительно малое число импульсов, получают выход излучения порядка величины, обычной для современных терапевтических аппаратов с током в трубке 1 *ма*. При этом нужно заметить, что генераторная лампа RS329 (обычное амплитудное напряжение 4—6 *кв*, здесь — 200 *кв*) с ее вытянутым цилиндрическим анодом, само собой разумеется, была очень неблагоприятна для дозиметрии (опыты умышленно проводили с полностью рассогласованной лампой, чтобы получить данные для конструктивных изменений формы специальной импульсной трубки).

Из опытов с импульсным трансформатором выявились дополнительно следующие технические преимущества:

1. Все части установки до импульсного трансформатора несут только низкое напряжение до 10 *кв*, поэтому их можно изготавливать малого размера и небольшой стоимости.

Только рентгеновская трубка с импульсным трансформатором несет полное высокое напряжение.

2. Вследствие кратковременности отдельных импульсов практически нет опасности высокого напряжения на вторичной стороне импульсного трансформатора (скин-эффект, высокая частота), в то время как защиту от прикосновения к деталям аппаратуры, находящимся под напряжением до 10 *кв*, можно осуществить простейшими средствами.

3. В большинстве случаев целесообразно соединить в одно целое трубку и малый по весу и объему импульсный трансформатор и отделить их от остальной аппара-

туры. При этом соединительный кабель, нагруженный амплитудой импульсного напряжения только 10 *кв*, можно сделать легким, гибким и надежно защищенным от пробоя. Изготавливаемый в настоящее время коаксиальный кабель для такого напряжения имеет диаметр 12 *мм*.

4. Благодаря кратковременности импульса рентгеновская трубка в действительности нагружена высоким напряжением только 1/1 000 ее рабочего времени. Появляется также дополнительная гарантия сохранности нити накала. Устраняется выход из строя трубки при колебаниях напряжения сети или других нарушениях, таких, как, например, высокочастотные блуждающие волны перенапряжения.

5. Способ позволяет применять рентгеновские трубки с ториевым или оксидным катодом, т. е. с катодами, которые при высокой эмиссии имеют малую температуру накала и высокий срок службы.

О величине конденсаторов и работе средств включения сказано в разд. А и В. Рентгеновские импульсы в этом смысле не отличаются от других потребителей. Трубка с анодным напряжением 100 000 *в* и пиками тока 5 000 *а* соответствует активному потребителю с сопротивлением 20 *ом*. Поэтому ее нужно охарактеризовать как технически нормальный элемент схемы.

Другое мы имеем при рентгеновской трубке с импульсным трансформатором последнего типа. Здесь при рабочем напряжении около 200 *кв* и более и малой амплитуде тока около 10 *а* следует принимать омическое сопротивление порядка 20 000 *ом*. Следовательно, импульсный трансформатор должен быть рассчитан на эту нагрузку, причем длительность импульса не должна превышать 1 *мксек*, а произведение

$$200\ кв \cdot 10\ а = 2\ Мвт$$

при длительности импульса 1 *мксек* дает 2 *вт·сек* в импульсе. Если работают с 1 000 импульсов в 1 *сек*, то от трубки отводится термическая анодная мощность 2 000 *вт*, в то время как импульсный трансформатор, имеющий к. п. д. около 70%, должен передавать 3 000 *вт*, т. е. 3 *вт·сек* в импульсе. При напряжении на конденсаторе 10 *кв* и применении полистироловых конденсаторов, имеющих малый угол потерь, величина кон-

денсаторов получается 60 000 *пф* и индуктивность импульсного трансформатора, приведенная к первичной стороне при коэффициенте трансформации от 1 : 20 до 1 : 25, имеет величину

$$L = \frac{4t^2}{10C}$$

(длительность импульса рассматривают как четверть периода[1]); в нашем расчетном примере

$$\frac{4 \cdot 10^{-12}}{6 \cdot 10^{-7}} = 0{,}7 \cdot 10^{-5}\ гн = 7\ мкгн.$$

Таким образом, можно применить большое число витков.

Ниже будут приведены некоторые указания для конструирования рентгеновских трубок с накаливаемым катодом для импульсной эксплуатации.

Современная техника изготовления рентгеновских трубок для очень высоких импульсных напряжений предлагает в основном специальные трубки с холодным катодом, которые работают совместно с вакуумным насосом и при разряде в вакууме создают необходимую для рентгеновского импульса величину тока во много тысяч ампер при времени вспышки от 10^{-3} до 10^{-6} *сек*. Уже при длительности 10^{-6} *сек* лежит граница, при которой в трубке возникает лавина ионов. В противоположность этим импульсным трубкам можно применять для отдельных вспышек трубки с накаливаемым катодом обычного типа, питающиеся от импульсного трансформатора. Длительность импульса должна быть такой, чтобы в трубке не могла возникнуть или полностью развиться лавина ионов. Считают предельной длительность импульса напряжения в пределах 10^{-7}—10^{-6} *сек*. В противоположность отдельным мощным рентгеновским вспышкам вакуумные трубки должны давать хорошую среднюю интенсивность, когда их применяют для технологического просвечивания. Нужно стремиться к полу-

[1] Принимают, что через четверть периода периодического разряда первичное напряжение переходит через нуль и ток достигает своего максимума. Поэтому и вторичное напряжение, а также вторичный ток, так как рентгеновская трубка представляет собой омический потребитель, снижаются до нуля, так что импульс оканчивается.

чению высокой частоты следования с очень короткими импульсами напряжения на трубке. Тепловой режим, предусмотренный конструкцией этих рентгеновских трубок, получают согласованием средней анодной нагрузки и частоты импульсов с конструктивными данными. Существенно наличие в трубках торированных накаляемых или очень сильно нагреваемых вольфрамовых катодов. Но интенсивность излучения ни в коем случае нельзя регулировать нагревом катода, как это обычно делается в рентгеновских трубках, так как из-за краткости импульса мощность не успевает превратиться в трубке в излучение торможения.

Таким образом, имеют силу следующие основные правила:

1. Эксплуатация рентгеновской трубки должна производиться последовательными импульсами напряжения.

2. Частота следования импульсов выбирается порядка 10^2—10^3 импульсов в 1 *сек* для длительной эксплуатации при рентгеновской стробоскопии: для более коротких серий вспышек при общей энергии, термически заданной конструкцией трубок или желаемой средней интенсивностью излучения, в соответствии с данными трубки (например, в трубках с крышеподобным анодом, анодом с очень высокой теплоемкостью для серии вспышек с высоким содержанием энергии). Для рентгеновской съемки с большой скоростью перемещения пленки можно применять любую желаемую частоту, например 50 000 импульсов в 1 *сек*.

3. Длительность отдельного импульса напряжения должна быть меньше 10^{-6} *сек*. Если в трубке предусмотрены специальные детали, которые замедляют развитие ионного разряда, то можно работать с более длительными импульсами напряжения, но они всегда должны быть настолько короткими, чтобы препятствовать образованию лавины ионов. В рентгеновских импульсных трубках, эксплуатирующихся совместно с вакуумным насосом, можно переходить на увеличенную длительность импульсов и очень высокие напряжения.

4. Напряжение отдельного импульса может быть в несколько раз выше допускаемого среднего рабочего напряжения данного типа трубки (например, в обычной трубке на 70 *кв* анодное напряжение может составлять от 150 до 250 *кв*, так что жесткость излуче-

ния и количество рентгенов могут быть повышены без опасности повреждения трубки).

Вследствие особенности импульсной эксплуатации (трубки одинаково сильно термически нагружены как постоянным, так и переменным напряжением) можно повысить мощность рентгеновского излучения импульсами высокой мощности, не уменьшая срока службы трубки по сравнению с типовой установкой с намного меньшим номинальным напряжением.

При эксплуатации рентгеновских трубок с жестким излучением необходимо постоянно наблюдать за прогибом нити накала статическим притяжением к аноду. Разрыв нити накала представляет собой работу, для получения которой, кроме электростатической силы, необходим также путь, а именно отклонение нити накала от положения покоя. Приложенная к нити механическая работа равна интегралу силы по пройденному пути, который зависит от длительности действия силы.

Если к аноду прикладывается напряжение не постоянно, а краткими импульсами с большим интервалом между ними, можно значительно снизить длительность действия электростатического поля и ограничить деформацию, возникающую при одном импульсе, упругой областью. При этом необходимо, например применением торированных нитей, поддерживать высокую эмиссию. Если, например, нужно уменьшить опасность разрушения нити в трубке с рабочим напряжением 200 *кв*, то ее можно нагружать с частотой 1 000 импульсов в 1 *сек* с длительностью каждого импульса 1 *мксек*, причем интервал времени между импульсами в 1 000 раз больше собственной длительности импульса. При этом можно получить ту же интенсивность рентгеновского излучения, однако нужно иметь эмиттирующую способность катода, в 1 000 раз бо́льшую, чем при непрерывной эксплуатации с постоянным напряжением. Катоды, которые в других случаях неприменимы из-за хрупкости или мягкости (вплоть до температуры плавления), например торированные, вполне пригодны для импульсной эксплуатации.

При любом периодическом следовании импульсов высокого напряжения появляется опасность возникновения механических колебаний нити накала, так как ее собственная механическая частота, если не провести определенных конструктивных мероприятий, легко мо-

жет попасть в резонанс с частотой следования импульсов или ее высшими гармониками. Поэтому частоту собственных колебаний нити накала и ее подвески нужно сделать такой, чтобы она не возбуждалась от частоты следования импульсов с ее четными и нечетными гармониками. В нити накала данной конструкции можно легко возбудить резонансную частоту легким похлопыванием по трубке и осциллографически измерить ее с помощью микрофона. Этой частоты нужно безусловно избегать как частоты следования импульсов.

Если конструктивно тесно объединяют относительно маленький импульсный трансформатор со специальной рентгеновской трубкой, сконструированной по приведенным выше правилам, то целесообразно расположить их в одном корпусе и заполнить его вместо масла водородом, который, как известно, вследствие высокой скорости термодиффузии дает чрезвычайно быстрое выравнивание температуры. Схема с трубкой, имеющей накальный катод, показана на рис. 80. При этой схеме можно легко изменять как длительность и энергию импульсов, так и первичное напряжение и частоту следования. Дальнейшее преимущество аппаратуры заключается в том, что можно связать рентгеновскую трубку с управляющим прибором посредством обычного коаксиального гибкого кабеля, рассчитанного на среднее напряжение. До сих пор в аппаратах с рабочим напряжением 300 *кв* было трудно объединить трансформатор (источник высокого напряжения) и трубку в общий поворачивающийся тубус, требующийся при исследовании материалов. Было необходимо применять толстый малоподвижный кабель высокого напряжения и для наполнения только хорошо очищенное масло. Поэтому вся установка требовала особенно тщательного ухода.

Приведем некоторые соображения по развитию конструкций, в особенности в стробоскопической рентгеновской технике. Для рентгеновской стробоскопии запускают импульсный трансформатор от искровой камеры или игнитрона, которые служат для управления и получения рентгеновских вспышек. На рис. 80 показана такая эксплуатационная схема для рентгеновской кинематографии с трубкой для короткой серии вспышек при кратковременной повышенной мощности с управляемым импульсным трансформатором. Такие серии вспышек по-

зволяют фотографировать барабанной камерой, применяющейся при искровой кинематографии, а также синхронизировать их с перфорацией пленки.

Методы управления позже описанных аппаратов для высокочастотных вспышек также находят применение для управления аппаратами для рентгеновских вспышек [Л. 30]. Выпускаемые промышленностью аппараты ограничены общей энергией до 50 000 *дж*, частотой следования импульсов между 16 и 50 000 импульсов в 1 *сек* и устанавливаемой энергией отдельного импульса максимально 10 и минимально 0,5 *дж* в импульсе. Импульсы преобразуются импульсным трансформатором в импульсы высокого напряжения и подводятся к рентгеновской трубке с энергией серии вспышек, согласованной с теплоемкостью анода (массивный вольфрамовый анод). При импульсном напряжении 200 *кв* и длительности импульса 2 *мксек* при выделяемой на аноде энергии 10 *дж* необходимый ток эмиссии составляет

$$I=\frac{10}{2\cdot 10^{5}\cdot 2\cdot 10^{-6}}=25\ a.$$

Допускаемый ток эмиссии при наивысшем допускаемом напряжении на трубке в положении «Съемка» (анодная мощность 20 *квт* при напряжении 50 *кв*) составляет только 1 *а*. Поэтому здесь предусмотрен импульсный накал *13*.

Так как при применяемой здесь импульсной эксплуатации общая продолжительность серии вспышек очень мала, вольфрамовая нить накала очень кратковременно нагревается ниже температуры плавления разрядом собственного маленького конденсатора, включаемым одновременно с началом серии вспышек. Потери на излучение при этом незначительны, и в основу энергетического расчета величины конденсатора кладут массу вольфрамовой нити, температуру плавления и удельную теплоемкость вольфрама.

Пример

Удельная теплоемкость вольфрама 0,036 *кал/г · град.*
Масса вольфрамовой спирали 1 *г.*
1 *кал*=4,19 *дж.*
Температура плавления 3 380° С.

Теплота плавления 46 *кал/г* (резервная гарантия против пережога нити; энергия конденсатора не должна передавать теплоту плавления, необходимую для разрушения нити).

Энергия конденсатора

$$A = 4{,}19 \cdot 1 \cdot 3\,380 \cdot 0{,}036 = 510 \text{ дж}.$$

Напряжение конденсатора (выбирается в среднем в 2—3 раза больше, чем обычное максимальное напряжение на нити накала) 300 *в* (дает возможность применить обычные конденсаторы для фотовспышки).

$$\text{Емкость } C = \frac{2A}{U^2} = \frac{1\,020}{90\,000} \text{ ф} = 11\,400 \text{ пкф при 300 в}.$$

Калориметрическим испытанием из-за высоких фабричных допусков электролитических конденсаторов для фотовспышки устанавливается напряжение зарядки, при котором выделяются потребные по расчету 510 *дж*. Точная масса нити технических рентгеновских трубок, естественно, известна изготовляющим фабрикам.

Так как эмиссия вольфрама весьма сильно возрастает вблизи точки плавления, тонким регулированием напряжения заряда конденсаторов для импульсного подогрева легко осуществима установка импульсного трансформатора высокого напряжения на «жесткость». Его напряжение должно падать почти на 20% по сравнению с холостым ходом.

Вспышки прибора «Стробокин», а в данном случае и рентгеновские вспышки, синхронизируются инфракрасным щупом *4* с перфорацией пленки. Так как обычная пленка имеет четыре перфорационных отверстия на кадре 18×24 *мм*, поставлен делитель частоты *5*. Если скорость передвижения пленки равна 90 *м/сек*, то можно получить 5 000 кадров нормального формата. На конструктивно заданной длине пленки 1,5 *м* помещается 80 кадров. Отсюда получаются следующие технические данные:

Частота кадров: 5 000 в секунду.
Число кадров: 80.
Энергия вспышки: 10 *дж* в импульсе, электрическая 0,1 *дж* в импульсе, при к. п. д. 1% рентгеновского излучения.
Напряжение на трубке: 200 *кв*.
Ток эмиссии: 25 *а*.
Импульсная анодная мощность: 5 *Мвт*.
Длительность импульса: 2 *мксек*.

Форма кривой: колоколообразная; вследствие возрастающей жесткости излучения происходит практическое укорачивание действительной длительности вспышки.

Продолжительность работы (продолжительность серии вспышки): 80/5 000 *сек* = 16 *мсек*.

Тепловыделение на аноде: 80 × 10 *дж* = 800 *дж*, т. е. около 200 *кал* за 16 *мсек* (примерно равно одному периоду частоты 50 *гц*).

Конечно, по схеме рис. 80 можно использовать и другие рентгеновские импульсные трубки; тогда приходится добавить часть схемы для импульсного нагрева.

С возрастанием напряжения на импульсном трансформаторе улучшаются эмиссия и к. п. д., однако малые объекты из-за высокой жесткости излучения получаются на снимках неконтрастными. Вместо оптической синхронизации указанная аппаратура может также работать со стабилизированной кварцем управляющей частотой.

6. ИМПУЛЬСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ЖЕСТКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ[1]

а) Способ действия рентгеновской импульсной трубки

На рис. 81 схематически показана конструкция высоковакуумной рентгеновской импульсной трубки для импульсного напряжения 200 *кв*. В эвакуированном пространстве, окруженном металлической камерой *1* и фарфоровым изолятором *2*, находятся катод *3*, имеющий форму полого конуса, конусообразный анод *4* и кольцевой поджигающий электрод *5*. Для получения очень кратковременного, но крайне интенсивного импульса рентгеновского излучения между анодом и катодом возбуждается высоковакуумная искра, питаемая конденсатором. Зажигание производится искрой, пробивающей зазор между поджигающим электродом и катодом. Эта поджигающая искра вызывается импульсом высокого напряжения малой мощности, который синхронизирован со снимаемым процессом. Рентгеновское излучение,

---

[1] Конструкция Siemens'a частично повторяет проспект фирмы Sa.H.

Описание конструкции здесь подробно повторено, так как к ней могут быть приложены очень высокие напряжения и она представляет развитие рентгеновских трубок, описанных в разд. F, 4.

образующееся на аноде, выходит из трубки через окно *6*. Длительность рентгеновского излучения составляет около $5 \cdot 10^{-7}$ *сек*.

Принципиальная электрическая схема рентгеновской импульсной трубки для напряжений свыше 100 *кв* показана на рис. 82. Между трубкой и заряженным конденсатором расположен включающий искровой разрядник.

Поджигающий импульс, проходящий в нужный мо-

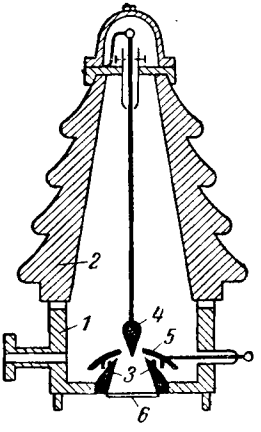


Рис. 81. Разрез высоковакуумной рентгеновской импульсной трубки с коническим анодом, конструкция Siemens'a (100 *кв*).

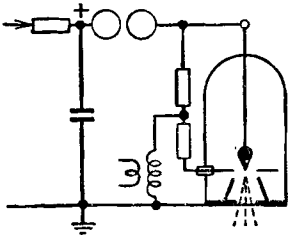


Рис. 82. Принципиальная схема рентгеновской импульсной трубки на напряжение свыше 100 *кв* с предварительным включением искрового разрядника.

мент, подается от импульсного трансформатора. Разряжающийся при этом конденсатор поддерживает искру на поджигающем электроде в течение 10^{-6} *сек*.

Импульсный трансформатор соединен с непоказанным на рис. 82 импульсным тиратронным включателем, который дает возможность синхронизировать рентгеновскую вспышку со снимаемым процессом с точностью до 10^{-6} *сек*.

Схема рентгеновской импульсной трубки на напряжение до 100 *кв* показана на рис. 83. В этом случае заряженный конденсатор уже перед пробоем соединен с импульсной трубкой. Поджигающая искра в зазоре между катодом и поджигающим электродом вызывает рентгеновскую вспышку.

b) Рентгеновский импульсный аппарат на 200 *кв*

Для 200-*кв* импульсного рентгеновского аппарата выбрали конструкцию, обеспечивающую наиболее универсальную применимость.

Рентгеновская импульсная трубка (принципиально сконструирована по рис. 81) соединена с масляным диффузионным насосом. Соединение частей выполнено с резиновыми уплотнениями. Детали могут легко разбираться, очищаться и в случае необходимости заменяться. Эти мероприятия делают срок службы трубки независимым от числа съемок и позволяют согласовать установку анода и его материал, окно выхода лучей и электродную систему с требованиями, предъявляемыми снимаемыми процессами. Трубка, имеющая окно для выхода лучей, расположенное внизу, укрепляется на кронштейне штатива. Она может переставляться по высоте и наклоняться без нарушения вакуума. Вследствие ее массивного выполнения она может успешно сопротивляться механическим нагрузкам, возникающим, например, при исследовании взрывов и детонаций. В окруженной кожухом части штатива находятся насосное устройство и аппаратура поджигания. Сверху на штативе расположены конденсаторы с включающим искровым разрядником в соответствии со схемой рис. 82. Автоматически управляемый контактор высокого напряжения осуществляет соединение конденсаторной батареи с кабелем, идущим от генератора высокого напряжения. Если работают исключительно с напряжением ниже 100 *кв* или импульсным трансформатором, то можно отказаться от искрового разрядника и верхней половины конденсаторного устройства (схема по рис. 83).

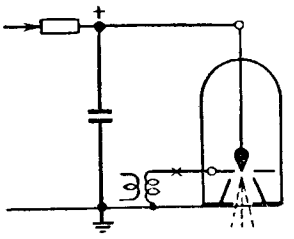


Рис. 83. Принципиальная схема рентгеновской импульсной трубки на напряжение до 100 *кв*; нужно трубку запирать полным напряжением.

Необходимые включающие устройства, контрольные лампы и делитель напряжения расположены на передвижном распределительном пульте. Поэтому можно обслуживать установку на безопасном расстоянии от снимаемого процесса, в защищенном от излучений месте.

Электрические данные трубки:

напряжение $U_{\text{макс}} = 200$ *кв*;
емкость $C = 0{,}08$ *мкф*.

На фокусном расстоянии 30 *см* можно просветить железо толщиной 1,2 *см* (это толщина слоя, при которой еще различается ступень толщиной 1 *мм*).

Эффективная длительность рентгеновской вспышки составляет $5 \cdot 10^{-7}$ *сек*. Она может быть сделана ниже 10^{-7} *сек* фильтрацией излучения, которая во многих случаях производится самим снимаемым объектом.

Включение поджигающего аппарата может быть хорошо согласовано с особенностями снимаемого процесса. Переключатель на передней стенке прибора устанавливается:

на контактное закрывание или открывание;

на положительный или отрицательный импульс низкого напряжения;

синхронизировано с синусоидальной частотой или частотой развертки.

с) Применение рентгеновских импульсных аппаратов

Возможность снимать с помощью рентгеновских импульсов быстротекущие механические процессы внутри непрозрачного корпуса получила многочисленные применения при исследовании детонаций и взрывов и в баллистике. Далее, возможны, например, исследование очень быстрых динамических процессов нагружения, процессов разрушения, внедрения артиллерийского снаряда в твердое тело и некоторых проблем изучения ракет.

В дальнейшем с помощью рентгеновских вспышек изучалось поведение ударных волн в твердых телах, жидкостях и газах. Импульсные рентгеновские снимки позволяют во многих случаях определить наступающее уплотнение материи. Например, исследовали с помощью рентгеновских вспышек акустические процессы при искровом пробое в изолирующих жидкостях.

Некоторые явления сопровождаются таким сильным светом, что оптическая съемка не может дать результата. Рентгеновская вспышка дает не зависящую от этого картину плотности объекта. При исследованиях электрической дуги, которая либо очень короткое время

горит, либо так сильно излучает, что пленка может находиться вблизи дуги лишь очень кратковременно, рентгеновская импульсная трубка может сослужить очень ценную службу.

Импульсные рентгеновские трубки могут получить значение для исследования быстрых процессов движения и в медицине. Например, с помощью рентгеновских вспышек исследуются процессы, происходящие в человеческой гортани при подаче голоса.

Еще в начальной стадии находится исследование тонкой структуры интерференцией рентгеновских вспышек. Способом съемки с очень сильным освещением (например, по способу Зеемана) одним отдельным импульсом, т. е. меньше, чем за 10^{-6} *сек*, можно получить интерференционные снимки монокристалла.

Также проводились опыты по биологическому воздействию рентгеновских вспышек. Так как возможно кратковременное получение крайне высокой мощности доз (10^8 *р/сек*), здесь также еще могут быть открыты интересные явления.

d) Рентгеновские диоды напряжением 1,5 *Мв* [Л. 113—119]

Особенно простые рентгеновские трубки были разработаны в СССР как диоды для высоких напряжений. Рис. 84,*а* показывает принцип устройства. На изоляционной трубе *1*, которая одновременно является изолятором и вакуумной камерой, намотана в один слой катушка *6*, которая расстоянием между витками фиксирует распределение импульсного потенциала по длине камеры *1*. Анодом является острие *5* вольфрамовой проволоки, которая закреплена в металлическом стержне-держателе *4*. Крышка *2*, посаженная на изоляционную трубу на замазке, несет присоединительный проводник *3*. Катод образован металлической оболочкой *7* и днищем сильфона *8*. Подача импульсного напряжения от заряженного конденсатора *13* производится по проводам *9* (заземлен в точке *10*) и *11* через искровой разрядник *12*.

Обычно конденсатор *13* собран как батарея импульсного напряжения по каскадной схеме. На рис. 84,*б* показана эквивалентная электрическая схема. Индуктивность *6* нужно выбрать так, чтобы совместно с емкостью

конденсатора *13* обеспечить длительность полупериода, равную двойной длительности рентгеновской вспышки; например, при длительности рентгеновской вспышки 0,3 *мксек* они должны быть настроены на частоту 800 *кгц*. Тогда не требуется поддерживать особенно высокий вакуум в трубке, так как точно фиксированы длительность импульса и распределение напряжения. По

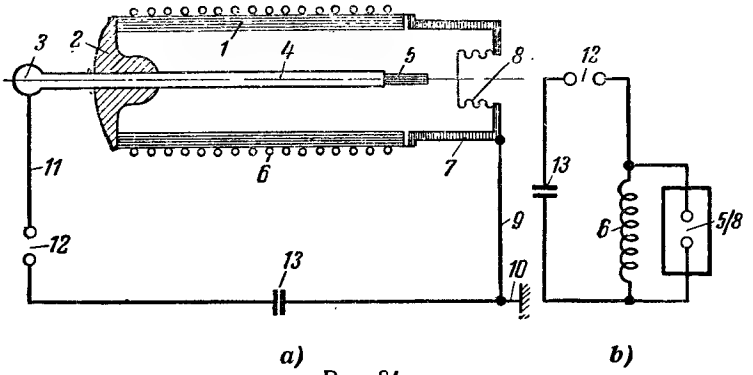


Рис. 84.

а — рентгеновский импульсный диод конструкции Богулёва со стабилизацией напряжения и одновременным фокусированием электронов цилиндрической катушкой, окружающей трубку; *б* — схема рентгеновских импульсных диодов с параллельно включенной индуктивностью. (Цифры см. в тексте.)

катушке *6* сразу после пробоя искрового разрядника *12* протекает ток возрастающей величины $\left(U=L\frac{dI}{dt}\right)$ и кратковременно фокусирует при этом электронный пучок в точку на аноде *5*.

По описанному здесь принципу построены производственно надежные трубки на импульсное напряжение до 1,5 *Мв*, которые выдерживают несколько тысяч вспышек и затем могут быть легко восстановлены. Острие анода так расположено в катодной камере, что металлизируется и нуждается в очистке только очень малая часть трубки.

Рис. 85 показывает принцип установки для включения по схеме рис. 84,*b* быстро следующих друг за другом импульсов. От источника напряжения U через зарядные сопротивления R заряжаются конденсаторы C и разряжаются через поджигаемые управляющим аппаратом искровые разрядники.

Установка была выполнена как чистая схема Кранца — Шардена с 16 различными трубками и конденсаторами, которые поджигаются одна за другой при напряжении 1,5 *Мв* и позволили успешно снять рентгеновский импульсный фильм приданной камерой со свинцовыми

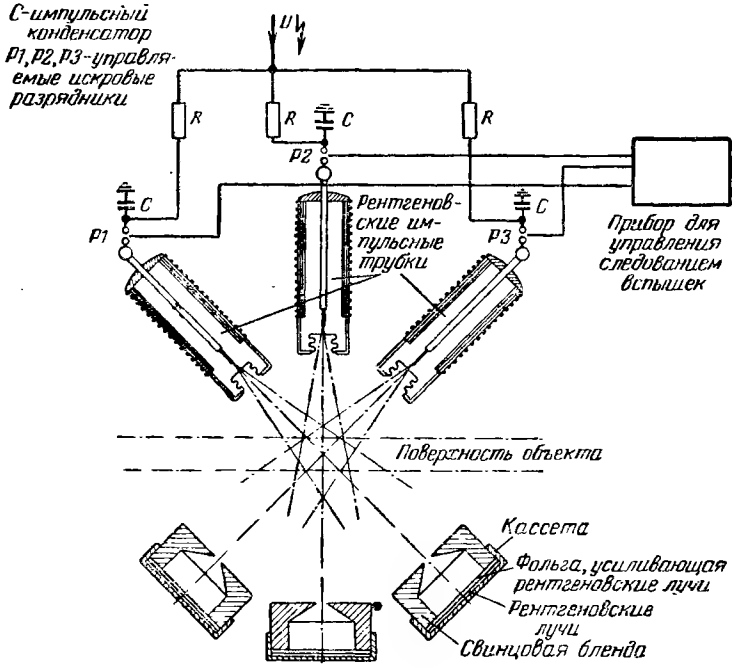


Рис. 85. Схема Кранца — Шардина для серии рентгеновских вспышек, фиксируемых несколькими камерами со свинцовыми блендами.

блендами [1]. На рис. 85 схематично показаны 3 импульсные трубки и 3 камеры со свинцовыми блендами, которые снимают плоскость объекта, например пробой бро-

[1] Фильм о пробое броневой плиты кумулятивным зарядом, снятый этой аппаратурой, был показан на IV Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии в сентябре 1958 г. в г. Кельне.

невой плиты, в точке пересечения лучей. При высоком напряжении 1,5 *Мв* лучи вследствие эффекта Комптона хорошо собираются в пучки и имеют высокий к. п. д. (η возрастает пропорционально $U^{3/2}$).

G. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ КОНДЕНСАТОРОВ В ТЕПЛОТУ

1. ИМПУЛЬСНАЯ СВАРКА, НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА

Простейшая форма емкостного сварочного устройства получается при непосредственном разряде конденсатора. Если (рис. 86) зарядить конденсатор *1* через со-

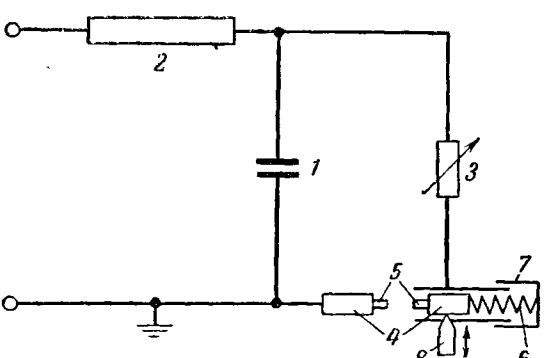


Рис. 86. Устройство для импульсной сварки с непосредственным разрядом конденсаторов и соударяющимися свариваемыми деталями.

1 — конденсатор; *2* — зарядное сопротивление; *3* — балластное сопротивление; *4* — зажимы деталей; *5* — детали; *6* — сжатая пружина, которая сводит массы *4—5* быстрее постоянной времени *1- 3*; *7* — гильза пружины; *8* — защелка.

противление *2* постоянным током и через балластное сопротивление *3*, служащее для регулирования энергии разряда, разрядить его на электроды *4—4*, в которых укреплены свариваемые небольшие металлические детали *5—5*, то можно произвести быстрое соударение электродов, отпуская защелкой *8* предварительно сжатую пружину *6*, регулируемую гильзой *7*. Непосредственно перед соприкосновением вследствие разряда конденсаторов между поверхностями деталей проскакивает

искра; постоянная времени этого разрядного процесса устанавливается сопротивлением *3*. По меньшей мере катод искрового разряда при этом сильно нагревается и отчасти даже испаряется и вследствие очень быстрого дальнейшего сближения деталей *5—5* происходит сварка соприкоснувшихся мест. Этот очень простой процесс применяется при рабочем напряжении в несколько сотен вольт, для сварки очень малых, но трудно свариваемых другим способом деталей, например молибденовой проволоки с листами из вольфрама или других твердых металлов малой толщины, фольгой и т. п.

Существенным недостатком этого способа сварки является требование, чтобы детали перед сваркой не находились в контакте друг с другом, что затрудняет их установку. В некоторых других случаях, например при приварке тонкой проволоки к алюминиевой фольге, в разрядную цепь включают игнитрон, проводящий импульс тока. Коэффициент полезного действия при таком способе конденсаторной сварки чрезвычайно мал. Сопротивление свариваемых деталей между электродами измеряется долями миллиома. Наибольшая амплитудная величина тока в разрядном контуре при игнитронном включении в соответствии с данными игнитронов не превышает нескольких сотен ампер. При сопротивлении 1 *мом* и токе 1000 *а* падение напряжения в месте сварки равно 1 *в*. Нужно применять конденсаторы с рабочим напряжением во много сотен вольт, так как накопление энергии, как известно, со снижением напряжения быстро уменьшается. Поэтому к. п. д. вследствие распределения напряжения получается ниже 1%. При электролитических конденсаторах электролит служит одним из электродов и входит как значительное последовательное сопротивление в цепь тока, что еще более снижает к. п. д. по сравнению с бумажными конденсаторами.

Это обстоятельство имеет существенное значение, если выключатель расположен в разрядном контуре и требуется точно регулируемая сварка. Если по рис. 86, как обычно, свариваемые детали «выстреливают» друг в друга, то сопротивление искрового промежутка между металлами производит разогрев и в зависимости от размеров контура тока может составлять 1—50 *ом*, так что высокое сопротивление искрового промежутка при этом

становится термически полезным сопротивлением цепи и делает возможным получение хорошего к. п. д. Но, к сожалению, только часть энергии искрового разряда расходуется на нагрев зоны сварки, а бо́льшая часть энергии затрачивается на работу ионизации, звук и излучение. Поэтому термический к. п. д. на электродах по отношению ко всей затраченной энергии составляет чаще всего менее 5%. Но при очень малой свариваемой площади к. п. д. не представляет интереса, а приобретают особое значение недостижимая другими способами быстрота действия и неограниченно высокая температура на электродных пятнах искры. Относительно различных вариантов этого способа можно сослаться на работы [Л. 32, 33].

Наиболее подробно ударная сварка прямым разрядом конденсатора исследована Хофманном и Шухмахером [Л. 32]. Они работали в одном точно осциллографированном случае со 107 *мкф*, напряжением зарядки 1 500 *в*, индуктивностью 15 *мкгн* и сопротивлением разрядного контура 0,1 *ом*. Для замедления разряда в разрядную цепь можно включать дополнительную индуктивность 0—250 *мкгн*. Детали закреплялись в цангах, как в часовых токарных станках, и пружиной, имеющей постоянную сжатия 28,5, 86 и 425 *кГ/мм*, соударялись при движущейся массе 96 *г*. Проволока диаметром до 3 *мм* из твердых металлов может быть сварена без затруднений. Пружина с постоянной сжатия 86 *кГ/мм* сжата на 25 *мм*, и детали перед сваркой расположены на расстоянии около 10 *мм* друг от друга. Во время искрового разряда, который возникает перед самым соударением, в разрядном контуре измерен ток 3 000 *а*. Импульсная кажущаяся мощность при этом достигает 1 500 *в*$\times$ $\times$3 000 *а*=4,5 *Мва*. Давление осадки не имеет большого значения.

2. ТРАНСФОРМИРОВАННЫЙ РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА В СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКЕ

Для того чтобы к установленным между электродами и сжатым металлическим поверхностям, имеющим очень малое сопротивление (в большинстве практических случаев 10^{-5}—10^{-3} *ом*), подвести необходимую энергию и найти экономически выгодный переход от напряжения, имеющего величину порядка нескольких киловольт, слу-

жат импульсные трансформаторы (рис. 87). Вначале [Л. 34] конструированию этих трансформаторов не придавали особого значения, а применяли обычные силовые трансформаторы с их переходными процессами и всеми недостатками, которые создает сильное намагничивание постоянным током заряда конденсаторов. В выпущенных промышленностью машинах применены емкостные накопители энергии 10 000—30 000 *мкф* при напряжении зарядки 200—500 *в* *, т. е. мощностью от 200 до 3 750 *дж*, и этим очень длительно протекающим разрядом можно сваривать листы толщиной до 2 *мм*. Коэффициент полезного действия и прочие свойства этих первых конденсаторных машин ограничили их дальнейшее распространение.

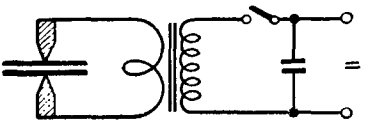


Рис. 87. Принципиальная схема импульсной сварки с трансформированным разрядом конденсаторов.

Следующий способ, названный просто «конденсаторной импульсной сваркой» [Л. 35], отличается от ранее упомянутого тем, что здесь применен трансформатор с очень прочной связью в соответствии с разд. D, который имеет разомкнутый, не насыщающийся сердечник. При этом обеспечивается такая связь между первичными и вторичными процессами тока и напряжения, что у трансформатора подобно рычагу в механике может приниматься во внимание только коэффициент трансформации.

Преимущества метода импульсной сварки[1]. В то время как при обычной контактной сварке энергия, подводимая к зоне сварки, регулируется сварочным напряжением и временем сварки, при конденсаторной сварке эта регулировка производится выбором напряжения зарядки и емкости рабочей батареи конденсаторов. Отсюда возникает существенное преимущество конденсаторной импульсной сварки по сравнению с обычной сваркой сопротивлением: выделяемое при сварке сопротивлением тепло зависит от произведения UI или I^2Rt, где U — напряжение сварки; I — сварочный ток; R — сопротивле-

* Philips, Einhoven.

[1] Здесь и далее термином «импульсная сварка» обозначена точечная конденсаторная сварка. (Прим. перев.)

ние сварной точки и t — время сварки. Сопротивление сварной точки имеет, таким образом, определяющее значение для сварочного нагрева и может при колебаниях, особенно из-за поврехностных переходных сопротивлений, вызывать разброс качества сварной точки. При конденсаторной импульсной сварке потребляемая из сети энергия — энергия заряда, накопленная в конденсаторах, постоянна. Также в первом приближении постоянно произведение UIt, что обусловлено постоянно одинаковыми условиями разряда через импульсный трансформатор. Различное сопротивление свариваемого металла влияет только на согласование, причем под согласованием понимается степень приближения условий разряда к предельному апериодическому случаю (рис. 88 и 89). При этом энергия, подводимая к свариваемому металлу, остается существенно постоянной. Практика показывает, что изменение сопротивления сварной точки в отношении 1 : 5 при импульсной сварке еще дает одинаковые результаты, в то время как при сварке с ограничением времени уже изменение сопротивления в отношении 1 : 2 нарушает процесс сварки.

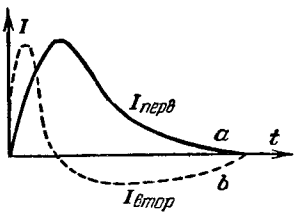


Рис. 88. Кривые первичного и вторичного импульсного тока при идеальном (апериодическом) согласовании.

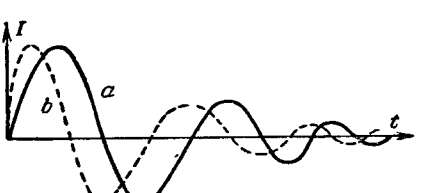


Рис. 89. Кривые первичного и вторичного импульсного тока при плохом согласовании (знакопеременные колебания).

a — первичный ток; b — вторичный ток.

Кроме очень стабильного качества соединений, метод импульсной сварки имеет и другие преимущества: в отличие от остальных методов сварки энергия сети потребляется в паузы между сварками, так как в это время происходит зарядка конденсаторов. Зарядка по сравнению со временем сварки происходит относительно медленно и без значительной импульсной нагрузки в токоподводящей сети (время сварки относится ко времени

зарядки примерно, как 1 : 100). В мощных конденсаторных машинах можно, кроме того, подключать конденсаторы трехфазно и получать вполне равномерную загрузку фаз и коэффициент мощности $\cos\varphi$, близкий к 1. Так как конденсаторы всегда заряжаются до установленного напряжения, при методе конденсаторной сварки относительно постоянная энергия сварки не зависит от колебания напряжения сети; только время зарядки изменяется в зависимости от напряжения сети.

Следующим достоинством конденсаторной сварки является очень малое время сварки (0,02—0,002 *сек*) при очень большом токе. При кратковременности сварки отвод тепла вследствие теплопроводности не играет заметной роли и размеры зоны нагрева строго ограничены. Часто незаметны цвета побежалости даже в непосредственной близости к месту сварки. Структура зоны сварки обычно более мелкозерниста, чем структура основного металла вдали от сварки. Такая структура придает большую прочность точке, сваренной методом конденсаторной сварки. Вследствие того что зона сварки строго ограничена, появляется возможность сваривать различные по толщине листы, например лист толщиной 0, 5 *мм* можно сварить с листом толщиной 10 *мм* или приваривать головки болтов к тонким листам без изменений на обратной стороне листов.

Малое время сварки имеет решающее значение при сварке высоко электро- и теплопроводных материалов, например серебра, меди и алюминия. В определяющем нагрев произведении I^2Rt время t нужно уменьшать, чтобы уменьшить теплоотвод. Кроме того, сопротивление R очень мало. Чтобы в этих условиях достичь высокой температуры сварки, нужно работать при высоких значениях тока I, который входит в квадрате в формулу нагрева. Алюминий имеет узкую область пластичности, и вследствие этого безусловно требуется очень точное дозирование сварочной энергии для достижения требуемого результата. Это требование особенно хорошо выполняется при импульсной сварке вследствие точно повторяемой установленной энергии сварки, короткого времени сварки и весьма высоких значений сварочного тока. Поэтому импульсная сварка особенно подходит для цветных металлов.

Наиболее высокий к. п. д. при импульсной сварке

достигается тогда, когда кривая разряда конденсаторной батареи носит апериодический характер, т. е. когда колебательный контур, образуемый первичной обмоткой импульсного трансформатора и конденсаторной батареей, сильно демпфирован нагрузкой вторичного (сварочного) контура. При этом идеальном случае согласования активное сопротивление свариваемого металла, приведенное к первичной стороне трансформатора пропорционально коэффициенту трансформации, представляет апериодическую нагрузку для разрядного контура. Тогда для границы апериодической области действительно соотношение

$$R\dot{u} = \sqrt{\frac{4L}{C}},$$

где u – коэффициент трансформации;

L — результирующая индуктивность рассеивания трансформатора;

C — емкость.

При данном сопротивлении места сварки можно выбором u и C (и в определенных границах также L) достичь благоприятного согласования. Осциллограммы на рис. 90 показывают первичное и вторичное напряжения. Насколько тот факт, что при импульсной сварке сварочный ток в первый момент достигает своего высшего значения и после этого снижается примерно по логарифмической кривой (в то время как при обычной сварке сопротивлением ток колеблется около постоянного среднего значения) благоприятно воздействует при сварке, еще нужно исследовать, но на основании получаемых результатов сварки нужно предположить положительное влияние. Область апериодического разряда конденсаторов не только дает лучший к. п. д. превращения электрической энергии в тепловую, но также благоприятна для электрической прочности конденсаторов. Так как при апериодическом разряде заряд конденсаторов не меняет полярность, электрическую прочность конденсаторов можно выбрать намного ниже, чем для конденсаторов, работающих на переменном токе.

Конструкция импульсной сварочной машины. Импульсная сварочная машина состоит из автоматического зарядного устройства и импульсного сварочного трансформатора. В то время как зарядное устройство может быть

как передвижным, так и стационарным, относительно легкий и маленький импульсный трансформатор, соединенный с зарядным устройством подвижным кабелем, можно встроить непосредственно в сварочную машину. Принципиально от одного зарядного устройства можно питать несколько импульсных трансформаторов, причем в этом случае целесообразно для каждого трансформатора иметь отдельную батарею конденсаторов и выключатель разряда.

Работа зарядного устройства видна из схемы на рис. 91. От выпрямителя высокого напряжения, состоящего из высоковольтного трансформатора *1*, вентиля *2* и выключателя *3*, заряжается большая батарея конденсаторов *4* от нескольких сотен до 1 000 *мкф*. Напряжение заряда можно устанавливать небольшим управляющим устройством *5*, содержащим чувствительное реле и вспомогательный выпрямитель.

Рис. 90. Осциллограммы первичного и вторичного напряжения на импульсном трансформаторе.

Верхняя — первичное напряжение разряда, отметки времени (темное маркирование) 10^{-3} *сек*; нижняя — вторичное напряжение разряда на сварочных электродах; длительность сварки $7 \cdot 10^{-3}$ *сек*.

Напряжение, необходимое для постановки сварной точки, устанавливается регулируемым сопротивлением *6* и управляющим прибором *5* на заданное значение. Выключатель *3* позволяет заряжать конденсаторную батарею до тех пор, пока будет достигнуто установленное напряжение. После этого выключатель *3* прерывает зарядку и конденсаторная батарея *4*, заряженная до нужного напряжения, готова к работе. Для сварки теперь приводится в действие выключатель *7*, и батарея конденсаторов *4* разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора *8*. Выключатель *7* — специального типа; он может включать высокое напряжение и значительные нагрузки. При этом не происходит потери энергии на искру включения, так как выключа-

тель втягивается весьма быстро посредством разряда конденсатора на катушку, причем медные контакты способствуют замедлению поджигания искры при их сближении. Выключение не вызывает никакой трудности, так как в этом случае конденсаторная батарея уже не заряжена, т. е. напряжения на ней нет; таким образом, выключение высокого сварочного тока исключается. От

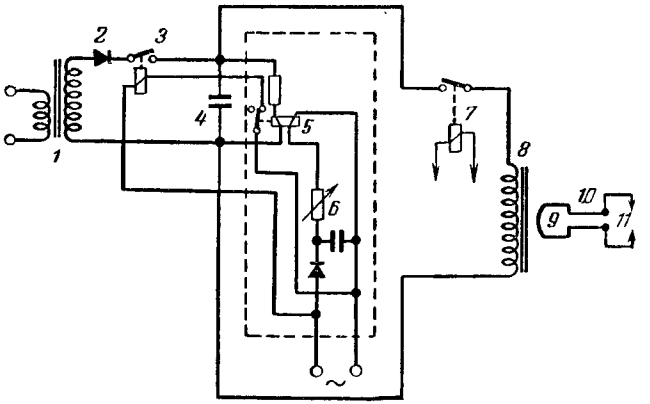


Рис. 91. Схема аппарата для импульсной сварки с трансформированным разрядом конденсаторов.

вторичной обмотки *9* импульсное напряжение подводится шиной *10* к электродам *11*, между которыми расположен свариваемый металл.

Импульсный трансформатор. Возникающий при разряде конденсаторов на первичную обмотку быстро изменяющийся магнитный поток может быть передан только соответствующим большим импульсным трансформатором, причем вторичный ток представляет собой первую производную по времени от первичного. Рисунки 88 и 89 показывают прохождение тока при хорошем (т. е. апериодическом) и плохом согласовании (например, неверно выбранном коэффициенте трансформации или слишком большой индуктивности проводов). В принципе можно импульсный трансформатор делать без железного сердечника (рис. 92), так как вследствие большого импульса тока в начале разряда железный сердечник насыщается и трансформатор в этом случае

работает более или менее подобно трансформатору без железного сердечника; во многих практических случаях может иметь значение незначительный вес сварочного трансформатора без железа.

На практике чаще всего применяется железный сердечник, не замкнутый или замкнутый с воздушным за-

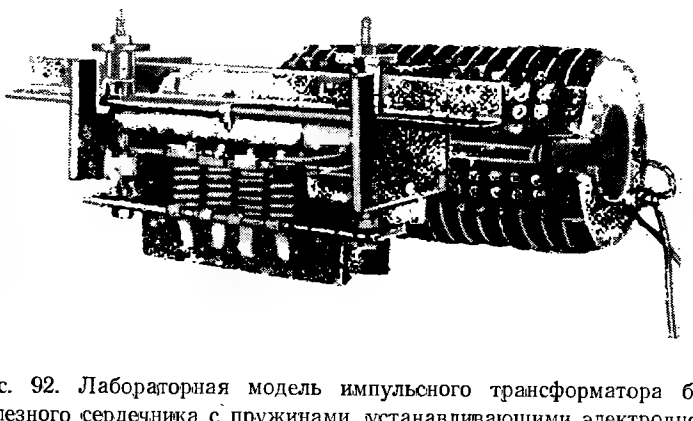


Рис. 92. Лабораторная модель импульсного трансформатора без железного сердечника с пружинами, устанавливающими электродное давление, для экспериментов по вакуумплотной приварке трубных вставок.

зором, так как при этом можно достичь более благоприятного согласования [1].

Для хорошего импульсного сварочного трансформатора необходима очень тесная связь между первичной и вторичной обмотками; для этого вторичную обмотку делают из одного-единственного компактного витка, которого со всех сторон окружают секции первичной обмотки. При этом необходимо, чтобы прочность изоляции между первичной и вторичной обмотками была около 10 *кв*, так как сварочная обмотка в целях безопасно-

[1] В машинах фирм Raytheon Mfg., Waltham/Mass и. Peco, Мюнхен, применяется замкнутый сердечник из высокомагнитного материала (например, гиперсиль с индукцией 18 000 *гс*); в машинах большой мощности фирмы Früngel, GmbH, «Impulso» и. «Vitessa», наоборот, применены незамкнутые железные сердечники.

сти должна быть заземлена. Коэффициент трансформации может изменяться в пределах 600 : 1, 300 : 1, 150 : 1.

При конструировании импульсных трансформаторов необходимо делать вторичный контур с минимальной индуктивностью, чтобы он не воздействовал, как дроссель, на высокий импульс тока. Безусловно, нужно добиваться индуктивности ниже 1 *мкгн*, если к. п. д. не

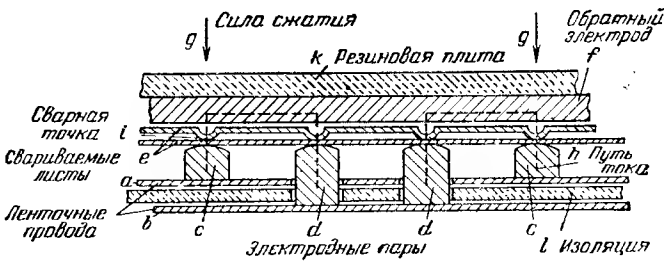


Рис. 93. Схема расположения электродов при двухточечной сварке.

a, *b* — низкоиндуктивный ленточный провод, ведущий к импульсному трансформатору; *c*, *d* — сварочные электроды, монтируемые на лентах *a*, *b*; *e* — свариваемые детали, здесь — два свариваемых листа; *f* — нейтральный противоположный электрод для выравнивания тока между *c* и *d*, расположенный с обратной стороны свариваемых деталей; *g* — направление сжимающей силы, которая действует на резиновую плиту *k* и совместно с нею образует систему с высокой собственной механической частотой, которая должна быть выше максимальной частоты импульсного сварочного тока; *h* — путь тока; *i* — рельефы на детали для предварительного направления сварочного тока, которые позднее образуют сварную точку.

должен сильно снижаться. Поэтому токоподвод к сварочным электродам делают из тонких ленточных, сжатых в плотные пакеты проводников, которые разделены только необходимой изоляцией и лишь в непосредственной близости к электродам расходятся на нужное расстояние. Еще более благоприятное малоиндукционное расположение электродов достигается при двухточечной сварке, при которой нейтральный проводник действует как противолежащий электрод (рис. 93).

Ниже в табл. 4 приведены технические данные различных импульсных сварочных машин. Приведены существенные параметры конструкции, такие, как время сварки, энергия и амплитуда рабочего тока.

Электроды. Особое значение при импульсной сварке имеет электродное давление, которое в общем случае должно быть выше, чем при обычной сварке сопротивле-

нием. Во время процесса сварки материал исключительно быстро плавится, причем обе свариваемые детали, находящиеся под электродным давлением, сближаются. Давление, таким образом, должно быть такой величины, чтобы электроды плавно и достаточно быстро следовали за уменьшением сечения. Это достигается сжатой пружиной, имеющей высокую частоту собственных колебаний, расположенной непосредственно над сварочным электродом и перемещающей электрод по меньшей мере так быстро, как плавится так называемое сварочное ядро. В качестве электродных материалов могут применяться материалы, обычные в сварочной технике. Так как при импульсной сварке в обмотках трансформатора в электрододержателях и электродах имеются очень малые потери на джоулево тепло, к. п. д. машины высок и электроды так незначительно нагреваются, что можно чаще всего пренебречь внешним охлаждением или в сильно нагруженных установках ограничиться охлаждением воздушным обдувом.

Производство сварки. При импульсной сварке очень важно точно ограничить зону касания обеих свариваемых деталей, потому что только при касании в точке или по линии можно сужением линий тока в месте сварки получить необходимую высокую плотность тока и соответственно создать достаточно большое давление на свариваемые поверхности. Только в этом случае возможна безукоризненная сварка.

Далее необходимо, чтобы рабочая площадь электродных наконечников была больше площади сварной точки, чтобы токовая нагрузка в месте перехода от электрода к материалу была не слишком высокой и не происходило припекания свариваемого материала к электроду. Оказывается применимым отношение поверхности соприкосновения электрода к свариваемой поверхности 3:1. На практике это условие хорошо выполняется, например, при крестообразной сварке двух проволок (например, каждая проволока диаметром 3 *мм* и электрод диаметром 6 *мм*). Касание обеих проволок происходит практически в точке, касание проволоки и электрода — по линии; как только к электродам прикладывается давление, точечное касание расширяется до площади около 1 $мм^2$ и поверхность касания электродов до 0,5 *мм*×6 *мм*=3 $мм^2$. При сварке двух листов целесооб-

Импульсные сварочные машины Raytheon Mfg. Co.,

Тип	18A	60A	225 B	1100
Высота, *см*	39	46	61	127
Ширина, *см*	20	28	28	43
Глубина, *см*	51	36	36	81
Энергия конденсаторов, *вт·сек*	18	63	225	1 080
Амплитудный ток, *а*	1 700	3 000	8 000	16 000
Время разряда (сварки), *мсек*	3,3—10,8	3—17	3—17	80—32
Емкость конденсаторов, *мкф*	28	14, 28, 56	50, 100, 200	60, 120, 240
Регулируемое напряжение заряда, *в*	425—1 150	650—1 500	650—1 500	1 000—3 000
Число сварных точек в минуту:				
при максимальной энергии	50	60	60	60
при минимальной энергии	250	120	120	300
Сварочная головка, тип „Raytheon"	I	ISS	I	ISS
Рабочее давление, *кГ*	0,5—5	0,25—7	0,5—5	0,25—7
Машина по своей мощности соответствует примерно полупериодной машине мощностью, *ква*	—	5,8	15	60
Сварочное напряжение, *в*	10—40			

Таблица 4

Уолтгэм, Ресо, Мюнхен, Dr. Frûngel, Гамбург

1101	1103	FP1K	FP2K	Impulsa	Vitessa	
127 43 81	127 43 81	107 90 55	46 29 56	130 125 75	Шкаф 1 010 70 60	Стол 80/130 70 60
2 700	8 100	300	1 000	2 000 (макс. 4 000)	6 000 (с дополнительной батареей 12 000)	
— ›	—	10 000	30 000	35 000	70 000 (с дополнительной батареей 100 000)	
—	—	2,5—5	2	2—20	Около 2—20	
120	120	366, 500	80	30, 80, 25	90, 240, 750	
—	—	300—1 100	1 000—5 000	1 000—4 000	1 000—4 000	
35 300	8 300	60 3 000	20 100	4 000 *дж*—2 3 000 *дж*—6 2 000 *дж*—10 1 000 *дж*—50	12 000 *дж*—2 6 000 *дж*—6 4 000 *дж*—30 1 000 *дж*—120	
ILSS 0,25—12	H 20—250	H 20—250	H 20—250	H 20—250	K 50—1 000	
350	470	60—120	500	100—1 000	300—3 000	
10—40		5—20		3—12	6—24	

разно на одном листе выдавить точечный или линейный рельеф, который определяет и ограничивает по месту сварную точку или сварной шов. При приварке медного многожильного провода к листу сначала электрической дугой оплавляется конец провода в виде капельного шарика, который после этого приваривается сварочным импульсом к любой подкладке. При стыковой приварке (например, заклепки к пластине) можно на пластине сделать выступ, либо привариваемая деталь может оканчиваться конусом, чтобы получилась малая площадь касания свариваемых материалов и возник значительный местный нагрев. Вследствие взаимного сплавления обеих свариваемых деталей во время сварки заклепка всем сечением прочно присоединяется к подкладке.

Потребление энергии. Накопленная в конденсаторах энергия $E = \frac{1}{2} CU^2$ ($вт \cdot сек$), где C — емкость конденсаторов, *мкф*, и U — зарядное напряжение, *кв*. Для расплавления, например, 1 *г* стали необходимо затратить около 1 000 *вт·сек*. При достижимом к. п. д. 50% необходимо в конденсаторах накопить соответственно в 2 раза бо́льшую энергию, т. е. 2 *квт·сек*, чтобы получить так называемое сварочное ядро весом 1 *г* или объемом $^1/_8$ *см*^{3}. При сварке цветных металлов из-за незначительного джоулевого тепла, возникающего в деталях, сварочная энергия должна быть выше, а, с другой стороны, точка плавления этих металлов обычно намного ниже. Энергия, необходимая для одной сварки, может быть очень быстро найдена экспериментально и после этого оставаться одинаковой для всех последующих сварок одного типа; она может быть изменена в широких пределах (например, в отношении 1 : 100). Вторичное напряжение сварки можно изменять выбором коэффициента трансформации и напряжения зарядки в пределах 1—5 *в*. В соответствии с требуемой производительностью сварки и параметрами зарядного устройства сварку ведут с ритмом около 1 *сек*, при шовной сварке — значительно менее [1].

[1] В импульсных сварочных машинах Ресо зарядка конденсаторов происходит в течение одной полуволны сетевого напряжения, а во время второй полуволны происходит разряд. Поэтому можно сварную точку ставить во время каждого периода, т. е. 50 раз в 1 *сек*, что необходимо, например, при шовной сварке пружинящих материалов малой толщины.

Сварочная продукция. Уже в 1943 г.[1] методом импульсной сварки были сварены стальные радиолампы и металлические стабилизаторы в поточном производстве при отбраковке по плотности высокого вакуума около 1%. Возможность сварить высоковакуумный шов длиной до 100 *мм* сварочными импульсами служит доказательством высоких производительности и качества импульсной сварки. В настоящее время импульсная сварка применяется также при сварке сетчатых строительных проволочных полотен в массовом производстве[2].

Важными являются полученные результаты сварки благородных и легких металлов, в особенности сварки разнородных металлов. Ниже приводятся некоторые применения, оказавшиеся пригодными в промышленности.

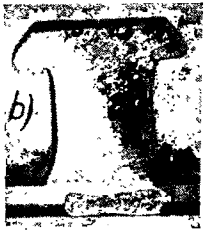
Приварка электрических контактов к подкладкам имеет техническое значение, поскольку она дает экономию материала, создает лучшее охлаждение контактов, а также чистоту и скорость изготовления по сравнению с обычно применяющейся клепкой.

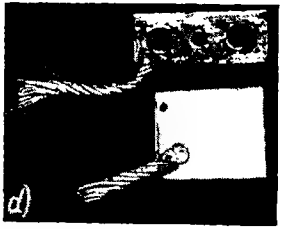
Все приведенные здесь примеры сварки производились электродами из обычной меди. Прилипания свариваемого металла к электродам не происходило. Исследование микрошлифов показало очень гомогенную и равномерную структуру при сварке однородных металлов, а при различных комбинациях металлов может быть установлено сплошное касание пограничных плоскостей в сечении и взаимное сплавление обоих металлов (рис. 94). Испытание на разрыв показывает высокую прочность при правильном проведении сварки. В противоположность так называемой холодной прессовой сварке, которая также допускает сварку различных комбинаций металлов, при импульсной сварке не нужно никакой подготовки свариваемых металлов. Тонкая окисная пленка на алюминии или меди не влияет отрицательно на сварку, в то время как ржавчина причиняет ей вред.

Импульсные сварочные машины, правда, дороже и сложнее, чем обычные точечные. Низким уровнем брака, а также экономией материалов при сварке благородных

[1] Osram, GmbH, Берлин, Машина для импульсной сварки Geräteentwicklung, GmbH, Данциг.

[2] Bau-Stahlgewebe, GmbH, Дюссельдорф.





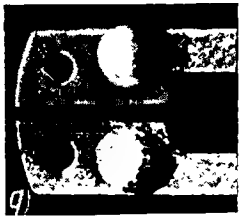


Рис. 94. Внешний вид и фотографии микрошлифов соединений, выполненных импульсной сваркой.

a — сварка Al—Al; две проволочки диаметром по 3 *мм*; *b* — приварка медной заклепки к биметаллу; *c* - приварка двух серебряных проволочек к серебряной подкладке; *d* — приварка 100-жильного медного провода к меди (сверху) и алюминию (снизу); *e* — фотография микрошлифа, медный многожильный провод приварен к алюминиевому листу; *g* — серебряные контакты на бронзовой пружине, контакты реле; *f* — фотография микрошлифа серебряного контакта на бронзовой пружине.

металлов в данном случае компенсируется более высокая стоимость машины. Поэтому импульсную сварку применяют главным образом для решения особых задач, в особенности в массовом производстве, или для таких проблем, которые не могут быть решены обычными способами сварки.

Преимущества конденсаторной сварки можно коротко подытожить: малая нагрузка сети, возможность равномерной загрузки трех фаз с хорошим углом сдвига фаз (часто экономия на установленной мощности выше стоимости импульсной сварочной машины), независимость напряжения заряда от напряжения сети, так как оно выравнивается отдельным стабилизатором, малый общий нагрев свариваемого материала, отсюда мелкозернистая структура. Возможна сварка вблизи чувствительных к нагреву материалов. Поверхность изделий остается чистой, так как за короткое время сварки едва ли может произойти окисление. Могут быть сварены детали разных сечений и из разнородных металлов, поскольку не возникает никаких металлургических затруднений. Также могут быть сварены хорошо проводящие металлы, в особенности металлы контактов с подкладками, однако безусловно нужно обращать внимание на выбор размеров сечения: рабочая поверхность электродов должна быть больше, чем площадь контакта в месте сварки. Высокая производительность из-за малого нагрева электродов, простое обслуживание вследствие возможной и даже необходимой автоматики и связанная с этим стабильность в массовом производстве приводят к незначительной степени брака.

На рис. 95 показана принципиальная схема маломощной конденсаторной импульсной машины с мощностью 5—450 *вт·сек*.

Бесступенчатый регулирующий кольцевой автотрансформатор *Tr1* с очень жесткой связью, чтобы обеспечить быструю подзарядку конденсаторов, устанавливает требуемое напряжение повышающего трансформатора *Tr2*. Двухполупериодный выпрямитель *Gr1* заряжает конденсаторную батарею *C2 — 4* с трехступенчатым переключением. Собственно импульсный сварочный трансформатор имеет два различных коэффициента трансформации, например 250 : 1 и 500 : 1, соответственно материалу сварного соединения, переключаемые контактором *Sch3*.

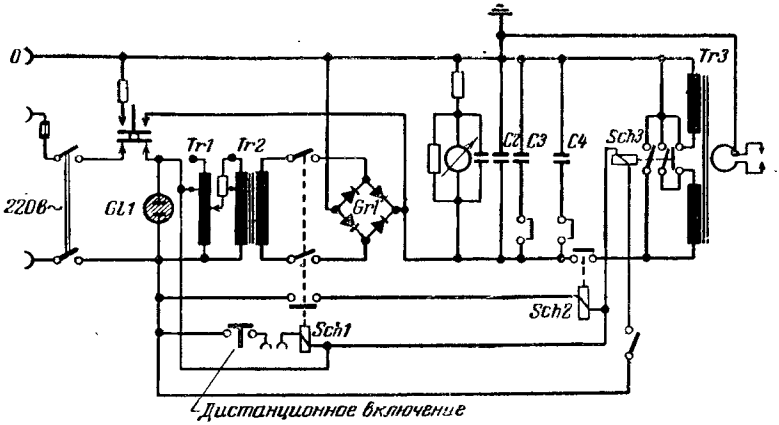


Рис. 95. Схема маломощной конденсаторной импульсной машины с мощностью от 5 до 450 *вт · сек*.

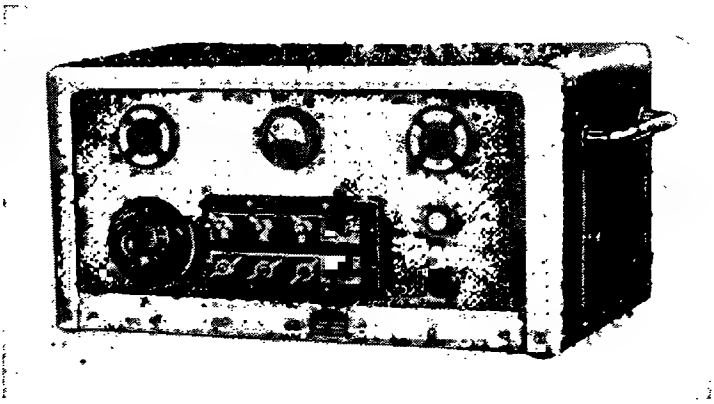


Рис. 96. Образец выполнения машины по рис. 95. Сварочная энергия 5—450 *вт · сек*, максимальный сварочный ток 30 000 *а*. Впереди шины для подключения ленточных проводов от сварочной головки.

Выключение сварки производится одновременно контакторами *Sch2* и *Sch1*. Контактор *Sch1* отключает конденсатор на время сварки от выпрямителя высокого напряжения, и после этого нормально открытый контакт этого выключателя подключает катушку контактора *Sch2*, благодаря чему заряд конденсаторов проходит через

импульсный трансформатор *Tr3*. Изменением емкости конденсаторной батареи в отношении 1 : 3 : 10 и варьированием напряжения зарядки в отношении 1 : 3 появляется возможность регулирования энергии в отно-

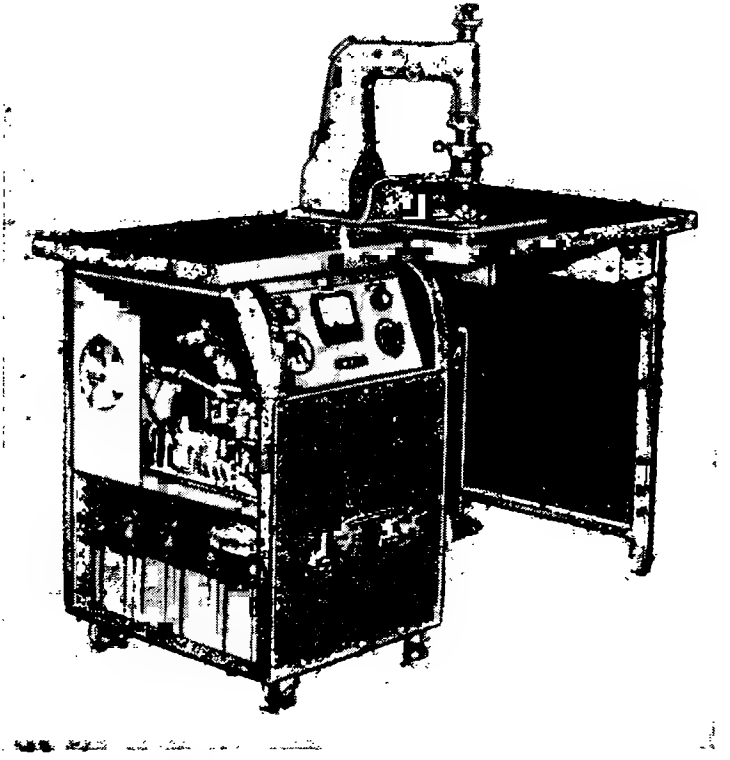


Рис. 97. Импульсная сварочная машина «Impulsa». Сварочная энергия 10—2 500 *вт · сек*; максимальный ток 70 000 *а* с электронной стабилизацией высокого напряжения и игнитронной коммутацией.

шении 1 : 90. Для крайне малых объектов сварки, как, например, термопар из тонких платино-родиевых проволок, можно еще уменьшить *C2*. На рис. 96 показана такая маломощная машина. Обе клеммы вторичной стороны импульсного трансформатора выполнены винтовыми для присоединения малоиндуктивных ленточных

проводов; в то же время электроды в подобных машинах расположены отдельно и допускают автоматическое обслуживание. Электроды присоединены ленточными проводами с максимальной индуктивностью 0,03 *мкгн/м*. Ток короткого замыкания этой маломощной машины при

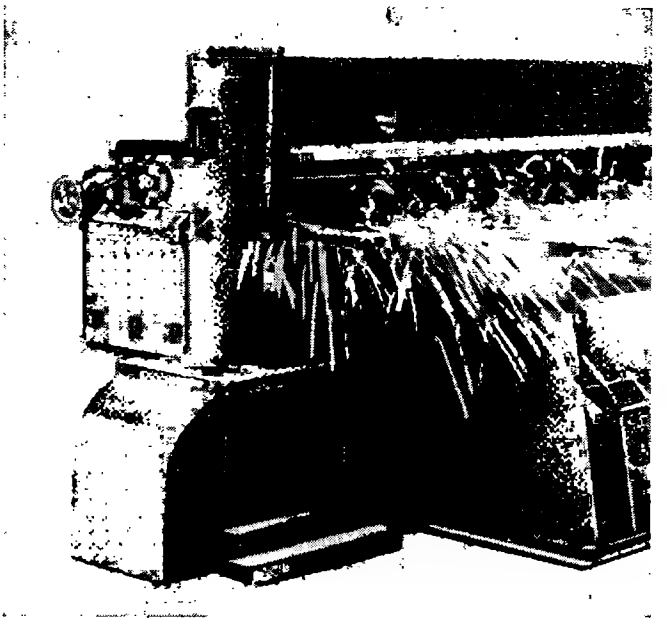


Рис. 98. Большая импульсная сварочная машина. Максимальный общий сварочный ток при мощности 50 000 *вт · сек*, протекающий через 25 электродных пар, составляет 1,2 *Ма*. Электродинамически выбрасываемые сварочные брызги действуют «охлаждающе» вследствие отводимой теплоты плавления. Обращает внимание равная скорость вылетающих брызг, составляющая около 10 *м/сек*.

максимальной энергии 450 *дж* достигает 30 000 *а*. Сварочное напряжение от 2 до 10 *в*.

На рис. 97 показана машина средней величины с открытой боковой стенкой. Внизу размещена конденсаторная батарея, над нею — вентилятор и детали реле, выключателя и аппаратуры зарядки высоким напряжением. В электродной части обращает на себя внимание

широкополосный токоподвод низкой индуктивности. Под нижним электродом помещена резиновая плита, которая гарантирует немедленную передачу давления с большой скоростью свариваемому металлу в период размягчения материала в сварной точке. Толщина и жесткость этой резиновой плиты имеют решающее значение для качества сварки и выбираются в зависимости от того, вязким или жидкотекучим становится свариваемый металл при температуре плавления. Эта машина также имеет очень малое потребление сетевой мощности — около 5 *ква*. Сварочный ток в ней достигает 45 000 *а*, а при прямом коротком замыкании электродов — 70 000 *а*.

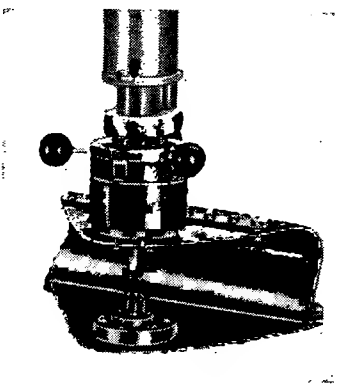


Рис. 99. Безындукционная электродная часть импульсной сварочной машины средней мощности. Для уменьшения индуктивности листовые проводники сделаны широкими.

На рис. 98 показана наибольшая импульсная машина, электрическая схема которой в принципе соответствует машине по рис. 97. В этой машине конденсаторная батарея может переключаться ступенчато на энергии 4 000—10 000 и 50 000 *дж*. Выпрямитель зарядного устройства трехфазный мощностью 100 *ква*. По сравнению с машинами среднего типа здесь дополнительно предусмотрена автоматическая разрядка конденсаторов перед каждым переключением машины.

На рис. 99 показана электродная часть машины средней мощности (1 800 *дж*). Следует обратить внимание на малоиндуктивное выполнение и резиновую подкладку под нижним электродом.

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ «ОХЛАЖДЕНИЕ» ВЫБРОСОМ ЧАСТИЧЕК, КОНДЕНСАТОРНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ СВАРКА

В очень больших конденсаторных сварочных машинах с энергией в импульсе до 50 000 *дж* время прохождения импульса тока бывает относительно большим (от $^1/_{50}$ до $^1/_{10}$ *сек*) и из-за этого термическая нагрузка на-

столько возрастает, что в месте сварки образуется относительно крупнозернистая структура, приводящая к уменьшению прочности. Чтобы устранить этот недостаток, определенным образом увеличивают ток при одновременном уменьшении времени его протекания и магнитным полем этого тока выдувают с большой скоростью капли расплавленного металла так, что даже при образовании относительно большой расплавленной ванны или глубоком внедрении деталей одну в другую и вследствие этого при относительно большой свариваемой площади образуется чистое, практически без грата сварное соединение. Дополнительно к магнитному дутью расплавившийся металл выдавливается из зоны сварки также под действием электродного давления, вследствие того что по меньшей мере один из электродов опирается на упругую или пластично-упругую подкладку, передающую усилие. Подобным образом обеспечивают частоту собственных механических колебаний более 100 *гц*, и механическая инерция настолько мала, что электродное давление во все время вылета жидких частиц из зоны сварки остается приложенным к деталям. Контур сварочного тока в машинах для двухточечной сварки чаще всего выполняют таким образом, чтобы вход и выход тока находились с одной стороны детали. При этом получается крайне низкая индуктивность электродного контура (менее 0,1 *мкгн*), благодаря чему амплитуда тока в 1 *мсек* возрастает до 10 000 *а*. Обратный сварочный электрод, размещенный на детали со стороны, противоположной токоведущим электродам, при двухточечной или многоточечной сварке не связан с трансформатором, а только со свариваемым металлом. Он расположен на упругом или пластически-упругом материале (резине), совместно с которым образует механическую колебательную систему с собственной частотой свыше 100 *гц*. В многоточечных машинах с большим числом сварочных трансформаторов система электродов с токоведущими проводами конструируется таким образом, чтобы электромагнитное силовое поле выдувало брызги жидкого металла из всех мест сварки в одном направлении.

Достоинство этого метода заключается, во-первых, в чистоте внешнего вида сварного соединения, обусловленной отсутствием грата, и, во-вторых в том, что обе

детали вследствие значительной области плавления или размягчения свариваются друг с другом на большей площади, благодаря чему увеличивается прочность сварки.

Так как электроды при сварке проволочных сеток имеют относительно большую, хорошо проводящую массу, тепло, воспринятое ими, всегда может быть отведено через излучение, теплопроводность и конвекцию. Дополнительное охлаждение выдуванием расплавленных капель делается совершенно ненужным.

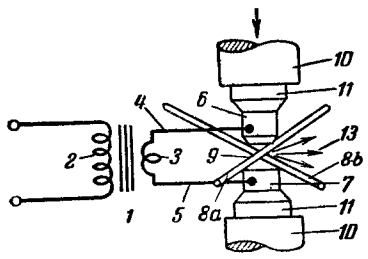


Рис. 100. Схема осуществления электродинамического выбрасывания сварочных брызг при импульсной сварке.

Принципиально можно применить этот метод для сварки металлов, покрытых окалиной или окислами, так как в отличие от обычных методов сварки расплавленный металл обязательно выплескивается и вследствие малой величины капель окисление их происходит очень полно.

На рисунках схематически показаны конструкции электродных контуров. Схемы принципиально соответствуют сказанному выше.

На рис. 100 показан сварочный трансформатор с железным сердечником *1*, первичной обмоткой *2* и вторичной обмоткой *3*, в общем случае состоящей только из одного витка, который безындукционными проводами *4* и *5* соединен с электродами *6* и *7*. Свариваемый металл *8a*, *8b* представлен в виде двух скрещенных проволок. Образующаяся в свариваемой точке ванна расплавленного металла выбрасывается в направлении, указанном стрелками *13*. Электроды расположены на упругом или пластически-упругом слое *11* и через него сжимаются механизмом сжатия *10*.

На рис. 101 показана особо малоиндуктивная конструкция токоподводов *4* и *5*, имеющих плоскую форму, и одновременно показано, как можно работать с одним обратным электродом *12*; электроды расположены на упругой прокладке *11* и сжимаются механизмом сжа-

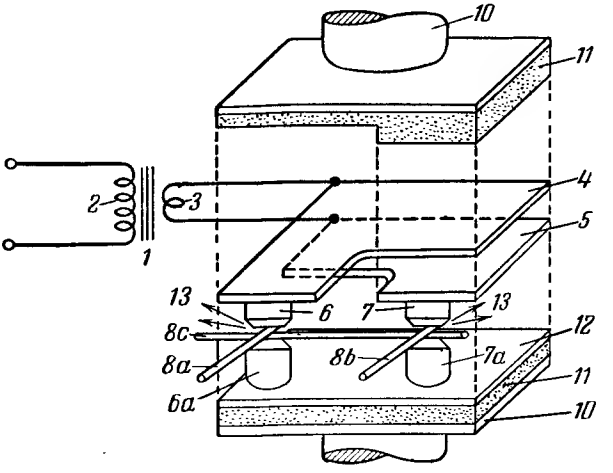


Рис. 101. Схема импульсной сварки проволочных сеток с малоиндуктивным расположением электродов. (Цифры см. в тексте.)

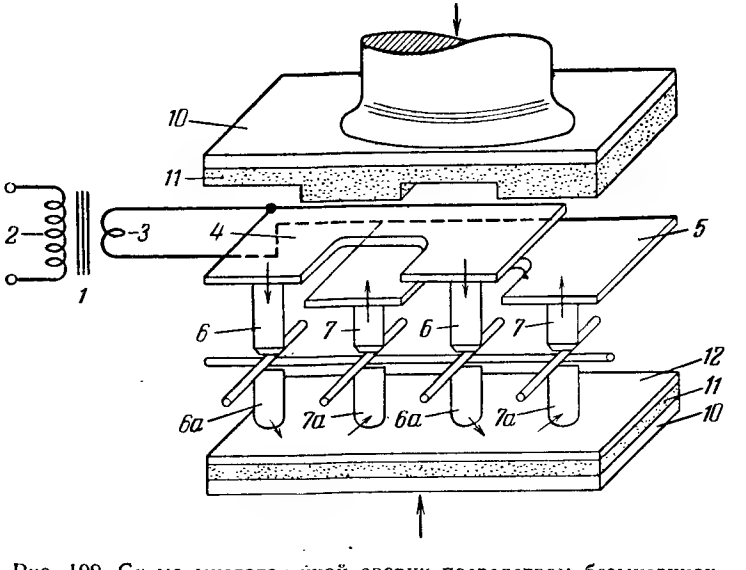


Рис 102. Схема многоточечной сварки посредством безынерционного подвода давления через резиновые прокладки непосредственно к электродам.

гия *10*. Электрод *12* не соединен с токоведущими листами *4* и *5*.

На рис. 102 показано устройство для изготовления проволочной сетки с электродами *6*, *7* и обратными электродами *6а*, *7а*; последние также могут быть заме-

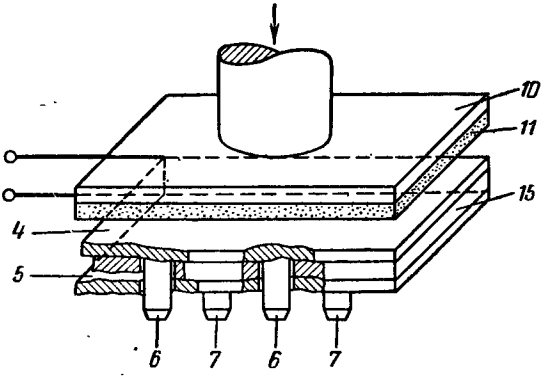


Рис. 103. Малоиндуктивное расположение электродов для четного числа сварных точек с односторонним токоподводом к детали.

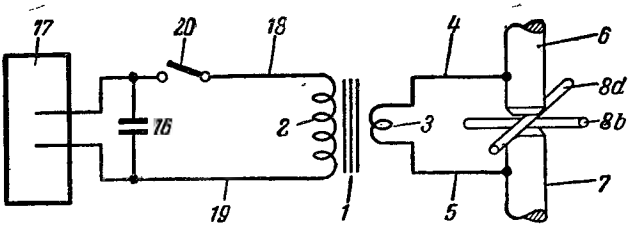


Рис. 104. Простейшая принципиальная схема импульсной сварки. (Цифры см. в тексте.)

нены одним пассивным проводом, например проволоки могут укладываться прямо на электродный лист *12*. Упругие пружинящие элементы обозначены *11*.

На рис. 103 показано несколько измененное устройство; в нем токоподводящие листы *4* и *5* изолированы друг от друга промежуточным слоем, вследствие чего отпадает необходимость в заметных на рис. 102 выемках в упругом слое *11*.

На рис. 104 показана общая схема сварки разрядом конденсаторов. Здесь источник высокого напряжения *17*

заряжает конденсатор *16* до установленного напряжения, а выключатель *20* через кабели *18* и *19* подводит импульс тока в первичную обмотку трансформатора *2*.

На рис. 105 схематически представлено обычное устройство, в котором выключатель *20* включается действием катушки *23*, получающей напряжение от выключающего аппарата *22* при замыкании контактов *21*, так что сварка включается в зависимости от давления.

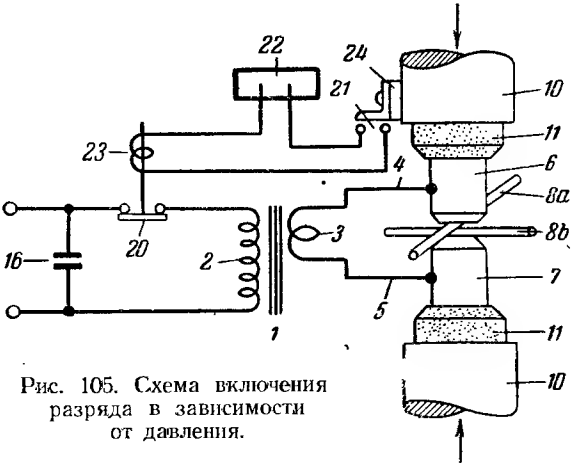


Рис. 105. Схема включения разряда в зависимости от давления.

Описанный способ пригоден для сварки деталей малой ширины и преимущественно круглого сечения. Место сварки должно быть свободно, чтобы не препятствовать образованию расплавленной ванны.

Для образования импульса тока, который за 1 *мсек* должен вырасти более чем на 1 000 *а*, необходимы индуктивность электродного контура менее 0,1 *мкгн* и прочная связь между обмотками импульсного трансформатора. Практические приемы, принципы которых здесь описаны, были использованы более чем в 20 мощных импульсных машинах с энергией конденсаторов 40 000—50 000 *дж* при напряжении заряда 2—5 *кв*, имеющих производительность 60 стыков в 1 *мин*, применяемых при изготовлении строительных арматурных сеток. Общий ток, проходящий через все электроды, достигает максимально 1,2 *Ма* (25 двойных точек с максимальным током в каждой 50 000 *а*).

На рис. 98 показана в работе такая мощная импульсная сварочная машина. Бросается в глаза одинаковая скорость частиц расплавленного железа; они пролетают за время экспозиции $^1/_{25}$ *сек* расстояние около $^1/_2$ *м*, т. е. со скоростью более 10 *м/сек*.

Очень мощные магнитные поля в таких импульсных трансформаторных машинах возникают при холостом ходе. Они настолько велики, что нагревают стальные детали машины. Чувствительные постоянные магниты, например в измерительных приборах, в непосредственной близости от таких машин необходимо экранировать. При импульсной сварке закаленных стальных деталей, например сепаратора шарикоподшипника с вложенными в него шариками наблюдается сильное остаточное намагничивание, поэтому часто становится необходимым помещать детали после сварки в размагничивающее устройство, например переменное магнитное поле.

В заключение еще нужно указать на аналогию между импульсной сваркой и импульсной закалкой.

При обоих процессах необходимая для быстрого и сильного нагрева энергия накапливается в заряжаемых конденсаторах. Во время разряда в детали электрическая энергия с высоким к. п. д. превращается в тепловую энергию для сварки или закалки. Маломощные импульсные сварочные устройства могут быть дополнительно снабжены высокочастотным генератором, благодаря чему они могут применяться как устройства для импульсной закалки.

4. МИКРОИНДУКЦИОННАЯ ЗАКАЛКА. ПРИМЕНЕНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО НАГРЕВА ИМПУЛЬСОМ НАКОПЛЕННОЙ ЕМКОСТНОЙ ЭНЕРГИИ

Другое термическое использование импульсная энергия находит в методе микроиндукционной закалки. Под этим понимают закалку очень тонкого слоя или области на поверхностях трения деталей из закаливающейся углеродистой стали. При поверхностной закалке стали используют точно регулируемый по времени и мощности высокочастотный генератор с нагревательной катушкой, так называемым индуктором, который по форме соответствует закаливаемой поверхности.

Отличие от ранее представленного способа импульсной сварки, при котором теплота возникает в месте

сварки, состоит лишь в том, что здесь импульсы энергии через высокочастотный генератор с очень высокой импульсной мощностью преобразуются в эшелон высокочастотных колебаний в области метровых волн. Практически можно многие части импульсной сварочной машины, например конденсаторную батарею с устройством зарядки и включения, использовать для обоих методов. Это дает возможность получать очень тонкие закаленные слои на трудных для обработки материалах и при этом сохранить преимущества метода импульсной сварки, такие, как независимость от напряжения сети, низкий процент брака и т. п. Для индукционной закалки посредством высокочастотного импульса в конденсаторах накапливается точно установленное количество энергии. Заряженный аккумулирующий конденсатор питает в течение короткого времени процесса разряда маленький УКВ передатчик, который преобразует электрическую энергию конденсаторов в теплоту, используемую для закалки деталей. Такой закалочный импульс очень короток и интенсивен. С помощью подобного высокочастотного импульса можно, например, закалить маленькие зубчатые колеса или оси часов и т. п. после точной обработки без коробления детали. Поверхности деталей любой формы могут быть закалены кратким высокочастотным импульсом в тех местах, которые испытывают большие силы трения или ударные нагрузки, отдельными штрихами или точками до или после обработки. Границы применения этого метода появляются, если холодная масса, влияющая на процесс закалки, становится слишком малой по сравнению с нагреваемой, т. е. закаливаемой массой. Импульсную закалку можно проводить на деталях, меньших по объему, чем те наименьшие, которые до этих пор подвергались высокочастотной закалке.

Уже около двух десятилетий применяют во все возрастающих размерах высокочастотные установки для индукционной термообработки стали, в особенности для поверхностной закалки. Поверхностная закалка вообще применяется в тех случаях, когда поверхность детали подвергается сильному износу. В противоположность прежним видам закалки, которые основаны отчасти на химических, отчасти на физических методах, индуктивная закалка в высокочастотном поле применяется все больше благодаря ее точной дозируемости и скорости,

а также сохранению постоянства формы изделия. Для сравнения способов микроиндукционной закалки с известной обычной индукционной закалкой ниже кратко изложен принцип высокочастотной закалки.

Высокочастотная закалка. При индуктивном нагреве энергия, необходимая для нагрева материала, подводится катушкой через магнитное переменное поле, которое в проводнике индуцирует высокочастотный переменный ток. В ферромагнитных материалах к этому добавляется нагрев, происходящий от потерь на гистерезис. Индуктивный нагрев тем больше, чем сильнее индуцируемые вихревые токи. Кроме того, нагрев зависит от свойств материала и геометрической формы детали. Далее используется явление скин-эффекта, вследствие которого деталь нагревается только на поверхности, и лишь вследствие теплопроводности нагрев распространяется внутрь детали. Плотность вихревого тока S максимальна на поверхности детали и убывает к середине по экспоненте (рис. 106).

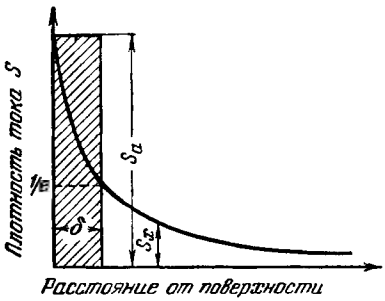


Рис. 106. Глубина проникновения переменного тока в металл.
δ — глубина проникновения; S_a — плотность тока на поверхности детали; S_x — плотность тока внутри детали.

Плотность вихревого тока S_x на любой глубине, измеренной от поверхности детали, составляет:

$$S_x = S_a e^{-\frac{x}{\delta}},$$

где $\delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$.

Здесь S_a — плотность тока на поверхности;
ρ — удельное сопротивление, *ом · мм²/м*;
μ — относительная магнитная проницаемость;
f — частота источника, *гц*;
δ — глубина проникновения высокочастотного тока, измеренная от поверхности детали, *мм*.

Глубина проникновения прямо пропорциональна удельному сопротивлению и обратно пропорциональна магнитной проницаемости детали; кроме того, значение δ снижается с ростом частоты. Значения ρ и μ изменяются при изменении температуры. Величина ρ растет при увеличении температуры; магнитная проницаемость μ, которая у стали в области магнитного насыщения принимает значения от 100 до 300, выше точки Кюри (для стали 760° С) равна единице, так как при этом исчезают ферромагнитные свойства. Таким образом, глубина проникновения вихревых токов в стали выше точки Кюри скачкообразно принимает большие значения. Рисунок 107 показывает глубину проникновения высокочастотного тока в различные материалы в зависимости от частоты, а рис. 108 — ту же зависимость для стали. Учитывая зависимость глубины проникновения от частоты высокочастотного тока, так же как и скорость распространения тепла вследствие теплопроводности, можно в общем случае сказать: если желательно получить возможно более тонкий закаленный слой, то нужно работать с возможно большей частотой и возможно меньшим временем закалки. Следовательно, требуется источник высокой мощности, который может передать в короткое время возможно больше энергии.

Рис. 107. Глубина проникновения δ как функция частоты для различных материалов (Fe — железо, M — латунь, Cu — медь) при комнатной температуре и 800—1 000° С.

Существенным для процесса закалки является охлаждение непосредственно после процесса нагрева. Различают внешнее (например, при обрызгивании водой) и собственное внутреннее охлаждение. При собственном внутреннем охлаждении деталь охлаждается холодной массой, лежащей под нагреваемым слоем. Известно также, что тонкий закаленный слой тем труднее получить,

особенно из-за процесса закалки после нагрева, чем меньше закаливаемая деталь. Как только закаливаемый и незакаливаемый объемы детали становятся равными по величине, возникает опасность сквозной закалки по всему объему вследствие теплопроводности во время процесса нагрева, так как масса, создающая самозакалку, становится слишком малой.

В мелких деталях пытаются получить закалку только поверхностного слоя, применяя крайне короткое и точно установленное время нагрева и высокую частоту. Но чтобы получить точно устанавливаемое время от $^1/_{100}$ до $^1/_{1\,000}$ *сек*, поскольку это вообще возможно, требуются значительные затраты. Об эту трудность до сих пор разбивается высокочастотная закалка наименьших деталей, например зубчатых колес и осей часовых механизмов, имеющих размеры, измеряемые долями миллиметра.

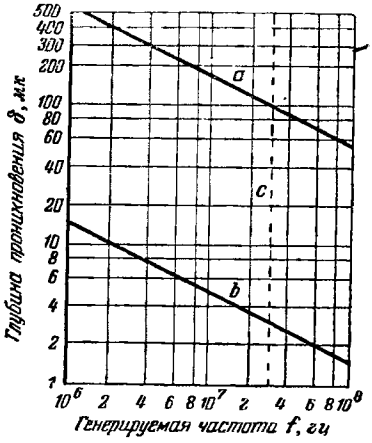


Рис. 108. Глубина проникновения δ высокочастотного тока в сталь в зависимости от генерируемой частоты f.

а — сталь при 1 000° С, $\mu=1$, $\rho=1{,}2$ *ом · мм²/м*; *b* — сталь при 20° С, $\mu=100$; *с* — частота, применяемая при импульсной закалке; $f=30$ *Мгц*.

Импульсная закалка. При импульсной закалке получают короткое время в противоположность высокочастотной закалке не применением более совершенной схемы включения, а автоматически разрядом конденсаторной батареи. Накапливают необходимую энергию для определенного процесса закалки в конденсаторе, питающем при разряде высокочастотный генератор, который преобразует электрическую энергию конденсатора в теплоту, выделяющуюся в детали. Электрическая энергия, которая содержится в заряженном конденсаторе, равна

$$E=\frac{1}{2}CU^2,\ вт\cdot сек.$$

Здесь C — емкость накопительного конденсатора, *мкф*;
U — напряжение зарядки, *кв*.

Можно, например, изменять ступенчато емкость и плавно напряжение зарядки и, таким образом, получать для использования любое содержание энергии в конденсаторе. Предполагая постоянным к. п. д. генератора, получаем дозируемость и воспроизводимость количества теплоты, выделяемой в детали напряжением зарядки и величиной накопительного конденсатора. Выравнивание зарядки конденсатора происходит очень быстро благодаря применению высокочастотного генератора. Легко достигается длительность всего процесса нагрева от 10^{-2} до 10^{-4} *сек*.

Необходимое для закалки детали тепло вычисляется из уравнения

$$Q = Gc_p\Delta t.$$

В этой формуле G — вес детали, *г*; c_p — удельная теплоемкость, *кал/г*·°С (для стали c_p=0,16 в среднем для температурного интервала закалки); Δt — разность температур, °С.

Индуцируемое в детали тепло равно произведению к. п. д. и подводимой в накопительный конденсатор энергии. Коэффициент полезного действия может определяться из опыта; он существенно зависит от так называемой подгонки источника тока, т. е. от благоприятного соотношения между сопротивлением детали и рабочим сопротивлением передатчика. Количество тепла Q и энергии, которая должна быть подведена к конденсатору (например, для определенной величины емкости она определяется напряжением зарядки), может быть приблизительно рассчитано; благодаря этому возможно приблизительное регулирование передатчика. Точное дозирование находят практическими опытами закалки. Схема передатчика показана на рис. 109. Накопительный конденсатор C заряжается через регулируемый трансформатор A и ламповый вентиль требуемым для каждого процесса закалки количеством энергии. Этот накопитель энергии питает во время разрядки конденсатора анодным током высокочастотный колебательный контур через выключатель высокого напряжения D. Высокочастотный передатчик E генерирует колебания в течение короткого промежутка времени, соответствующего коли-

честву энергии накопительного конденсатора и эффективному сопротивлению разрядного контура. Тесно связанная с колебательной катушкой G катушка связи K отнимает энергию высокочастотного колебательного контура и передает ее снова через индукционную катушку M (нагревающий индуктор) к детали N. Индуктор имеет форму, соответствующую данной детали.

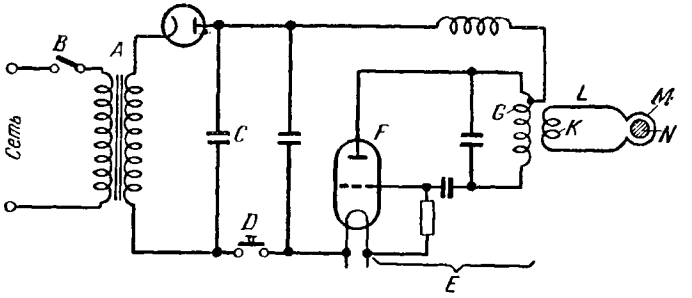


Рис. 109. Схема источника высокой частоты для импульсной закалки.

A — трансформатор высокого напряжения; *B* — включатель; *C* — накопительный конденсатор; *D* — высоковольтный выключатель или игнитрон; *E* — УКВ генератор; *F* — генераторная лампа; *G* — колебательный контур; *K* — вторичная катушка с ленточным проводником *L* к индуктору *M*, расположенному вокруг детали *N*.

Задача приспособления состоит в том, чтобы подогнать сопротивление детали к передатчику, потому что генераторная лампа может отдавать свою наивысшую мощность только тогда, если ее рабочее сопротивление, т. е. сопротивление колебательного контура, согласовано с сопротивлением детали. Для этого сопротивление детали при помощи катушки связи K приводят к пригодному значению и связывают с колебательным контуром. Действительное сопротивление детали в индукторе, конечно, не просто рассчитать, так как оно зависит от частоты передатчика, величины удельного сопротивления, так же как и от магнитной проницаемости детали. Оба названных последними фактора зависят от температуры. При закалке микродеталей подгонку формы индуктора к форме детали можно рассчитать только приблизительно; практический опыт и чутье чаще лучше и быстрее приводят к цели.

Из соображений удобства и безопасности (высокочастотное напряжение на индукторе достигает 10 *кв*) нагревательный индуктор должен находиться на некотором расстоянии от передатчика. Для соединения катушки связи с нагревательным индуктором используется низкоиндуктивная (и поэтому с малыми потерями) ленточная проводка, которая может быть сделана подвижной.

Для концентрации поля в нагревательном индукторе оказывается пригодным высокочастотное железо, в особенности тогда, когда можно производить закалку не внутри индуктора, а индуктор должен подходить снаружи к нагреваемой поверхности. Даже при обычной закалке придание надлежащей формы и пригонка индуктора к детали являются непростыми; при закалке микродеталей на форму индуктора нужно обращать особое внимание. Очевидно, нагревательный элемент не может быть сделан как угодно малым и при трудных для закалки деталях и других подобных им обстоятельствах необходимо мириться с низким к. п. д., который при очень малой потребной энергии не играет никакой роли в стоимости эксплуатации.

Процесс закалки. Нужно стремиться к тому, чтобы деталь после процесса закалки не требовала обработки. Если желательно избежать тонкой окисной пленки, возникающей при закалке из-за окисления на воздухе (цвета побежалости), то можно процесс закалки вести под защитным газом, например связать с передатчиком пневматический вентиль, через который в момент закалки вдувают на деталь поток аргона. Особенно при закалке мелких деталей (например, деталей часов) требуется, чтобы детали оставались светлыми. Возникающие без применения защитного газа цвета побежалости, однако, неидентичны с зонами закалки. Для того чтобы были видны зоны закалки, нужно прошлифовать и протравить поверхности деталей, лежащие в области зоны закалки. При этом темные зоны закалки отличаются от незакаленных светлых областей. Происходящее при процессе закалки превращение аустенита в мартенсит требует определенного времени, необходимого для распределения графита в кристаллитах феррита. При обычной температуре закалки между 800 и 900° С время этого растворения больше, чем время закалки. Ускоряют протекание

этого процесса повышением температуры закалки, например, до 1 100° С. При более длительном времени закалки такая высокая температура приводит к возникновению на поверхности детали растягивающих напряжений и так называемых закалочных трещин. Но при крайне тонком слое закалки применение такой температуры не представляет опасности. Кроме микродеталей, метод

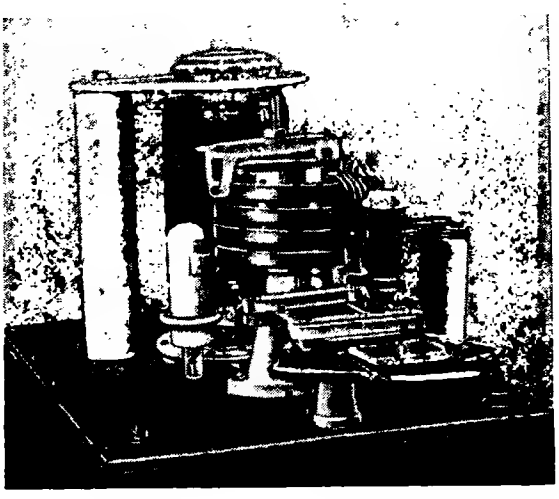


Рис. 110. Общий вид микроиндукционной закалочной установки с питанием импульсом разряда конденсатора. Энергия 10—2 000 *вт · сек*; генераторная лампа RS629 (Телефункен) с торированным катодом.

микрозакалки может быть выгодно применен также на больших деталях в особых случаях. На готовых обработанных плоских или криволинейных поверхностях, а именно в особо напряженных точках, можно легко получить отдельные закаленные зоны посредством импульсной закалки: кладут индуктор соответствующей формы, смотря по тому, хотят ли получить точечную или штриховую форму зоны закалки, близко к поверхности детали и дают краткий закалочный импульс. Большие холодные массы, окружающие разогретую зону, способствуют быстрому охлаждению; поток защитного газа предотвращает побежалость поверхности. Такие закаленные ме-

ста могут быть получены в любом количестве и в желаемом расположении на поверхности детали. При нагрузке трением работают несущие закаленные места детали; в то же время незакаленный мягкий промежуточный слой служит смазывающей подушкой. Здесь условия охлаждения особенно благоприятны; при этом глубина закалки довольно точно соответствует теоре-

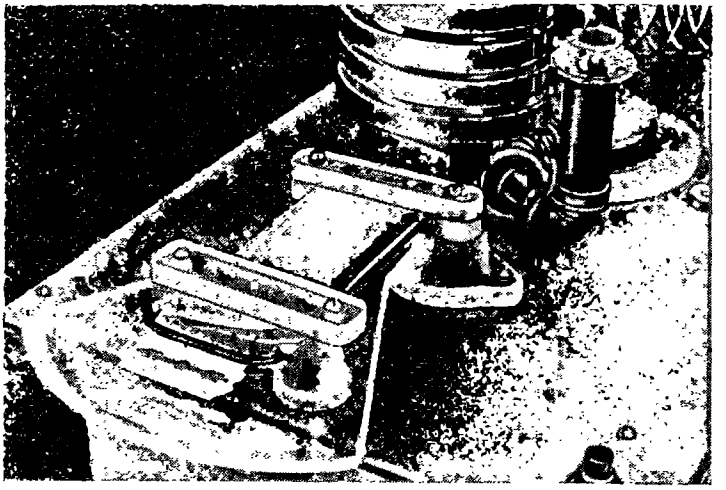


Рис. 111. Индуктор, подключенный для экспериментальной работы; бритвенное лезвие закаливается только на поверхности режущей кромки.

тической глубине проникновения высокочастотной энергии.

Приборы для импульсной закалки. Так как для микрозакалки достаточны малые мощности (смотря по детали, от 50 до 1 000 *вт* мощность передатчика), аппараты для импульсной закалки получаются относительно малыми, простыми и дешевыми. Можно одним передатчиком решать различные задачи закалки, в то время как для каждой детали делается особый индуктор и производится регулирование в широких пределах интенсивности закалочного импульса изменением величины емкости батареи и напряжения зарядки. Также и при авто-

матической закалке массовых деталей (можно производить закалку с тактом в 2 *сек*) достаточен для охлаждения индуктора между отдельными закалками окружающий воздух или поток защитного газа.

На рис. 110 и 111 показаны аппараты для импульсной закалки.

5. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ БЫСТРО ЧЕРЕДУЮЩИМИСЯ ИМПУЛЬСАМИ. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИСКРОВОЙ ГЕНЕРАТОР МАРКСА[1]

В противоположность описанному в разд. G, 4 превращению одного единственного большого запаса энергии, накопленной в конденсаторе, в одну серию высокочастотных колебаний с помощью обычного высокочастотного генератора можно каждым импульсом непосредственно возбуждать колебательный контур и после затухания колебаний (см. разд. B, 9) новым искровым разрядом создавать следующий импульс энергии и снова возбуждать контур. Таким образом, только регулируемой частотой искровых разрядов с периодической зарядкой и разрядом конденсаторов можно генерировать значительную длительную мощность высокочастотных колебаний (рабочая область 10—35 *квт*). В таких генераторах можно очень легко избежать радиопомех, так как здесь не возникают высшие гармоники, а только широкополосный спектр с обеих сторон рабочей частоты соответственно декременту затухания, например, 0,1, что означает при рабочей частоте, например 300 *кгц*, полосу шириной ±30 *кгц*. Такие полосы можно полностью устранить простыми расположенными на трансформаторе дросселями, как было доказано автором при постройке подобной установки.

Так как принцип искрового высокочастотного генератора, к сожалению, редко применяется, а в металлообрабатывающей промышленности вследствие его надежности, малой зависимости от колебаний напряжения сети (нет накаливаемых ламп!) и легкого устранения помех радиоприему он имеет действительные преимущества по

[1] Здесь приведена выдержка из протокола измерений Института техники высоких напряжений Высшего технического училища в Брауншвейге.

сравнению с ламповыми установками для индукционного нагрева простых деталей; ниже описано устройство такого комплектного генератора. Здесь зарядка конденсаторов производится переменным током, так как в течение каждого полупериода происходит большое число разрядов и не имеет значения, придан ли трансформатору выпрямитель или нет. В зарядной части применяют

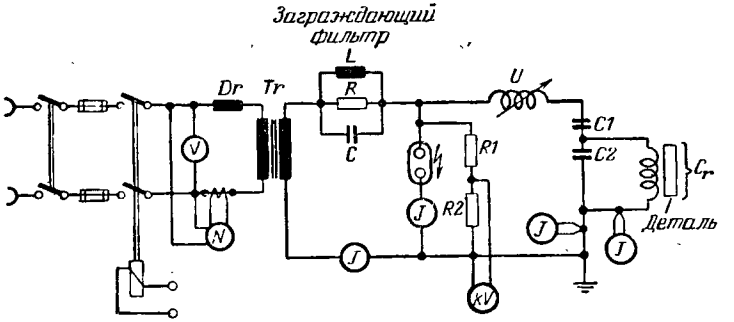


Рис. 112. Высокочастотное устройство с 35-киловаттным искровым разрядником с воздушным дутьем по Марксу. Конденсатор C_1 заряжается от *Tr* и разряжается с высокой частотой через искровой разрядник.

такой же трансформатор с рассеянием для уменьшения потерь мощности, как и в мощных импульсных сварочных машинах; конденсаторные батареи делают охлаждаемыми (рис. 112).

Число зарядок конденсатора обратно пропорционально $\sqrt{L_{др}C_r}$; кроме того, оно зависит от U_1 и U_2. В середине полупериода возникает наибольшее число импульсов. Контуры *I* и *II* имеют емкостную связь.

С помощью вариометра *U* при нагрузке контур *I* подстраивается к контуру *II*. Вследствие жесткой связи в контурах *I* и *II* имеются две разные частоты. Каждую половину колебания зажигается искра. Благодаря продувке искрового разрядника в отличие от искрогасящего разрядника, даже при больших расстояниях между электродами (3 *мм*), получают достаточно быструю деионизацию, поэтому и при большом числе импульсов высокое напряжение зажигания обеспечивается одной парой электродов.

Н. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ КОНДЕНСАТОРОВ В МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

1. СОЗДАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ОЧЕНЬ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В течение длительного времени постоянные магнитные поля представляли научный интерес для более глубокого исследования явлений, связанных с эффектом

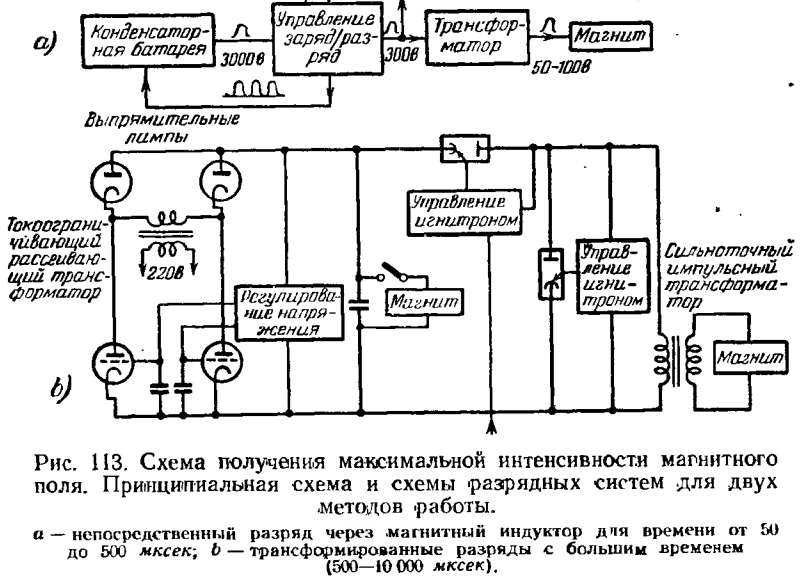


Рис. 113. Схема получения максимальной интенсивности магнитного поля. Принципиальная схема и схемы разрядных систем для двух методов работы.

а — непосредственный разряд через магнитный индуктор для времени от 50 до 500 *мксек*; *b* — трансформированные разряды с большим временем (500—10 000 *мксек*).

Зеемана; после открытия сверхтонкой структуры атомного ядра возникла задача создания чрезвычайно сильных магнитных полей для экспериментов с торами ядерных установок. При этом стационарные поля вряд ли можно реализовать при посильных затратах.

Фюрт и Ванек [Л. 14] указали границы, которые могут быть достигнуты при создании магнитных полей разрядами конденсаторов. Они различают очень кратковременные поля длительностью 50—500 *мксек*, которые получаются прямыми разрядами малоиндукционных им-

пульсных конденсаторных батарей, и более длительно существующие поля со временем существования 500—10 000 *мксек*, которые создаются конденсаторным разрядом через импульсный трансформатор. Применяемые схемы показаны на рис. 113,*а* и *b*. Магнит может питаться разрядом конденсатора, во-первых, непосредственно — в центре рисунка и, во-вторых, трансформированно — правая сторона рис. 113.

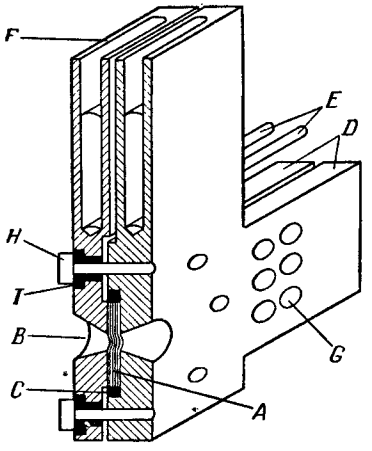


Рис. 114. Магнит 500 000 *гс* для оптических опытов.

A — магнитная катушка; *B* — канал оптических лучей; *C* — кольцо; *D* — листы из дюралюминия, ведущие к трансформатору; *E* — ввод жидкого азота; *F* — выпускная камера газообразного азота; *G* — перфорация для теплоизоляции; *H* — стальные болты; *I* — втулки.

Концентрация магнитного силового потока в заданном месте возможна так называемым концентратором Гельмгольца. Этот давно известный принцип получил сейчас значительно большее применение благодаря современной технологии материалов и средствам охлаждения. На рис. 114 показана конструкция такого концентратора. Питание импульсным разрядом производится через пару токоподводов *D*—*D*, к которым прочно присоединяются токоведущие листы. О необходимой конденсаторной батарее, ее размерах и выполнении отводящих листов, принимая во внимание потери энергии на механические деформации, см. разд. A и C. Если игнитрон в качестве включающего прибора является здесь излишним, можно использовать малоинерционный искровой разрядник в соединении с ударным включателем.

2. ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОЛЕЙ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

При создании свободно горящего разряда в торе для получения наивысших скоростей или температур в плазме для подвода энергии в разряд используют поля с рав-

номерно возрастающим градиентом. При этом применяют энергию конденсаторов до 200 000 *вт·сек* при времени разряда от нескольких сотен микросекунд до нескольких миллисекунд. При превращении этих больших количеств энергии разряда в магнитные поля возникают проблемы, уже рассмотренные в разд. А, 3 и В, 5, а также С, 5. Особо мощные игнитроны в разборном исполнении описаны в [Л. 81]. При импульсных токах 20—90 *ка* разряд в игнитроне идет не от одного электродного пятна, а возникают многочисленные пятна, каждое из которых эмиттирует ток возможно около 10 000 *а*. От отдельных пятен выбрасываются богатые энергией корпускулярные лучи ртути и, попадая на стенки корпуса, разрушают его поверхность после нескольких тысяч разрядов. Поэтому при изготовлении резервуара-баллона из тугоплавкого стекла нужно позаботиться, чтобы ни при каких обстоятельствах ртутные лучи не попадали прямо на стеклянные стенки. Между прочим, в [Л. 81] показана плоская форма игнитрона с дисковым графитовым анодом, который расположен на расстоянии нескольких сантиметров от зеркала ртути такой же величины. В этом случае лучи ртути падают на графитовый диск.

Для таких же или еще более высоких токов в ядерной технике хорошо служит механический ударный включатель, изготовленный по принципу, изложенному в разд. В, 5 и В, 6. Ударный пневматический выключатель, нагруженный током 20—100 *ка* при напряжении 20 *кв*, рассмотрен в [Л. 82]. Включающий механизм приводится в действие сжатым воздухом давлением 12 *ат*. Без затруднений получают 360 разрядов с токами 10—100 *ка* при напряжении 25 *кв*, после чего производится осмотр контактов. Контакты прижимаются пружиной. В известном английском аппарате Зета при амплитуде тока 20 *ка* и длительности импульса 500 *мксек* можно произвести 3 500 включений в течение 10 *ч*, и при некоторой еще не описанной модернизации получают до 80 000 включений магнитного поля. Баланс энергии при передаче энергии конденсаторов в магнитное поле рассмотрен в [Л. 83]. В этой работе также дано сравнение стоимостей конденсаторов с пропитанной бумагой, двуокисью титана и титанатом бария. Стоимость бумажных конденсаторов на 40% ниже, чем конденса-

торов с диэлектриком из титаната бария или двуокиси титана. Вместо конденсаторов для получения очень продолжительных мощных импульсов магнитного поля также могут применяться генераторы с маховыми массами. При очень большом потреблении энергии экономично накапливать ее не электрически, а в маховой массе большого генератора, при торможении которого появляется импульс тока. Требования, предъявляемые к таким генераторам, также изложены в [Л. 83], как и возможность получать импульсные токи от аккумуляторных батарей. Генератор с механическим накоплением энергии во вращающейся массе весом 20 *т* был построен в Канберре. В каждом кубическом сантиметре такой массы получили накопленную энергию 50 *вт·сек*, т. е. больше, чем можно накопить в таком же объеме конденсаторной батареи. Недостаток заключается лишь в том, что такая большая механическая энергия не может так легко спонтанно превращаться в энергию магнитного поля, как это возможно при конденсаторной батарее. Поэтому накопление энергии в маховых массах используется для питания импульсными токами длительностью в несколько секунд.

Правила конструирования разрядных ламп в сильных магнитных полях обсуждаются в [Л. 84]. В [Л. 85] описаны техника измерения сильноточных разрядов, а также измерительные зонды, которые вводятся внутрь сильноточного разрядного канала. Так как при плазменных разрядах ток течет не по металлическим проводам, обычная техника измерений неприменима, а возможно только косвенное обратное заключение о протекающем токе по наблюдению или фотоснимку плазмы.

Интересный обзор всех реализованных конструкционных элементов содержит британский проект Зета [Л. 86].

Эта работа передает ценную инициативу в пространственном расположении различных элементов конструкции, таких, как детали конденсаторов, распределительных шкафов и импульсных трансформаторов. Сами импульсные трансформаторы дискообразной конструкции описаны в [Л. 88], а также в разд. Д, 2.

Обзор наиболее существенных изготовленных до сих пор во всем мире импульсных установок больших токов

для наисильнейших магнитных полей в ядерных исследованиях содержит [Л. 89].

Если в разрядных контурах малой индуктивности требуются крутовозрастающие импульсы тока для получения магнитных полей, то пользуются параллельно включенными искровыми разрядниками, которые поджигаются одновременно.

Основы расчета подобной техники коммутации изложены в [Л. 87], а также в разд. В, 4 и 6. При этом применяют схему Маркса [см. разд Е, 1] для получения очень круто возрастающих импульсов поджигания искрового разрядника, инициирующих главный разряд.

Требуется очень хорошее охлаждение, как представлено на рис. 114, так как потери на джоулево тепло при этих больших токах чрезвычайно высоки и нагрев за короткое время может привести к плавлению материала.

Обычное охлаждение, например водой, протекающей под высоким давлением, хотя и достаточно, но применение жидкого азота имеет громадное преимущество в том, что омическое сопротивление материала вследствие низкой температуры на 20% ниже значения при комнатной температуре. Уменьшение омических потерь дает столь значительную экономию энергии, накапливаемой в конденсаторах, и удешевление установки, что затраты на охлаждение жидким азотом или воздухом окупаются.

Магнитная индукция порядка 800 000 *гс*, соответствующая примерно такому же числу ампер-витков, по сегодняшним представлениям техники находится на границе возможности больших токов в металлических проводах. Возникает вопрос: насколько еще действителен закон Ома при таких плотностях тока?

Баланс энергии, который получили Фюрт и Ванек, следующий:

7 800 *дж* — энергия, накопленная в конденсаторах
1 — 3 *мсек* — длительность разряда
35 : 1 — коэффициент трансформации импульсного трансформатора
40 000 *гс* — максимальное поле в течение 3 *мсек*
200 *дж* — энергия магнитного поля внутри катушки
1 500 *дж* — магнитная энергия во всей катушке
2 500 *дж* — термические потери.

Остается

4 000 *дж* — в основном потери в трансформаторе, который при времени разряда 10 *мсек* может иметь к. п. д. примерно 85%.

При охлаждении жидким азотом:
600 000 *гс*, 3 000 *дж* — магнитная энергия
1 000 *дж* — тепловые потери.
20 *см*³ азота испаряются при импульсе.

Для трансформаторов, питающих такие концентраторы Гельмгольца, действительно все сказанное в разд. С, 5 относительно возникающих механических сил, защиты от пыли высоконамагничиваемого, но имеющего большие потери стержнеобразного железного сердечника и охлаждения.

3. НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ С КОНДЕНСАТОРНЫМ РАЗРЯДОМ

При изготовлении постоянных магнитов нужно после закалки магнита намагнитить его. Это можно сделать в поле мощного электромагнита, но из-за его высокой стоимости отдают предпочтение приборам импульсного намагничивания. В них импульсная энергия может накапливаться индуктивно или в конденсаторах. В течение 40 лет применялось индуктивное накопление энергии, так как при равном содержании энергии было дешевле изготовить дроссель, намагничиваемый постоянным током, чем конденсатор.

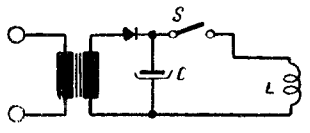


Рис. 115. Намагничивание разрядом электролитического конденсатора C на катушку L через включатель S.
Колебания тока из-за наличия электролита невозможны.

Благодаря непрерывному развитию конденсаторной техники конденсатор равной энергии стал дешевле, чем индуктивный накопитель энергии, так как прогресс в технике индуктивностей был практически невозможен. Основная энергия магнитного поля лежит, как известно, в воздушном зазоре дросселя, и конструкция дросселя, как и медных, намагничивающих обмоток, не была предметом фундаментальных новых исследований. Поэтому обычно сегодня намагничивающие приборы выполняют с емкостным накопителем энергии. В простых приборах этого вида применяют электролитические конденсаторы, обычно используемые в аппаратах для фотовспышки и являющиеся предметом массового производства, и разряжают их через намагничивающую катушку. Если используют, например, катушку с индуктив-

ностью 100 *мкгн* (100 витков диаметром 1 *см* для маленького стержневого магнита) и разряжают конденсатор 500 *мкф* при 500 *в*, то длительность полупериода (колебания тока из-за поляризованных электролитических конденсаторов невозможны, так как конденсатор не проводит ток в обратном направлении)

$$\tau = \pi\sqrt{LC} = \pi\sqrt{500 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-4}}\ сек \approx 0{,}7\ мсек;$$

из-за сильного демпфирования полупериод удлиняется до 1 *мсек*.

Ток соответственно заряду конденсатора $Q = CU = 5 \cdot 10^{4} \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 0{,}25\ а \cdot сек$, проходящему в течение 1 *мсек*, равен $I = 250\ а$. При 100 витках н. с.

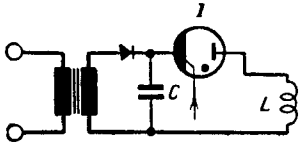


Рис. 116. Намагничивание разрядом бумажного конденсатора *C* высокой стоимости через игнитрон *I*, уничтожающий какие-либо колебания на катушку *L*.

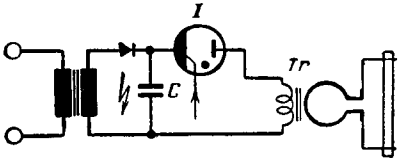


Рис. 117. Намагничивание разрядом высоковольтного конденсатора *C* большой энергии через игнитрон *I* в импульсный трансформатор *Tr*. С единственным вторичным витком соединен стержневой проводник, по которому проходит ток 10^4—10^5 *а*.

получается 25 000 *ав*. В действительности вследствие омических потерь в катушке и потерь в электролите конденсатора н. с. снижается до 15 000 *ав*. Видно, что даже этими простыми средствами уже можно получить эффективное намагничивание. Решающим недостатком является разложение электролита при форсированной длительной эксплуатации, так что приборы непригодны для массового производства. Если заменить электролитические конденсаторы металлобумажными и включать их посредством игнитрона, то можно получить чрезвычайно надежные приборы. На рис. 115—117 представлены простейшие описанные выше приборы, в том числе с игнитронным включателем и трансформированным разрядом конденсатора. Последний, так же как и старые приборы с дросселями, может быть выполнен однопроводным

(рис. 118), т. е. ток намагничивания проходит только через один стержневой проводник, что гарантирует быструю вставку в прибор магнитов, счетчиков и других массовых изделий, требующих точного намагничивания.

Получение намагничивающего поля посредством импульсного разряда конденсатора. Для намагничивания постоянных магнитов применяют намагничивающее поле, которое возрастает до максимума остаточного намагничивания (до верхней точки гистерезисной петли) и после этого снижается с установленной скоростью. Для получения намагничивающего поля применяют метод соленоидный или импульсный. Если верхняя точка петли лежит при H_E *а/см* и магнит имеет длину l *см*, то максимальное значение остаточного магнетизма получают, если выполнено соотношение $H_E = \frac{nI}{l}$. Здесь

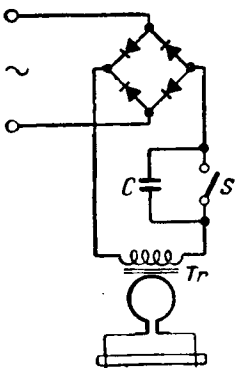


Рис. 118. Прибор с индуктивным накоплением. Через первичную обмотку трансформатора *Tr* протекает постоянный ток до насыщения; после этого размыкается выключатель *S*; при этом искра гасится конденсатором *C*. На единственном вторичном витке получают один апериодический импульс тока.

n — число витков и I — ток. По методу соленоида выбирают n большим, а I малым, при импульсном методе берут n малым, а I большим. Если $n=1$, что является обычным при импульсном методе, то ток должен быть равен $H_E l\ a$, чтобы намагнитить постоянный магнит до полного значения остаточного магнетизма. При импульсных методах нужно еще принимать во внимание изменение намагничивающего поля $\frac{dH}{dt}$, особенно при его уменьшении. Если превышают некоторое критическое значение, то в магните возникают слишком сильные вихревые токи, которые приводят к неравномерному намагничиванию.

В намагничивающих приборах с индуктивным накоплением энергия освобождается при разрыве контура постоянного тока и выделяется во вторичной обмотке в виде импульса тока. При этом скорость исчезновения поля нельзя точно определить, так как вообще она зави-

сит от скорости срабатывания выключателя в первичном контуре, температуры железа и формы вторичного витка.

В импульсных намагничивающих приборах на емкостной основе энергия накапливается в конденсаторе высокого напряжения. Для намагничивания массивным ударным выключателем или игнитроном производят разряд на первичную обмотку трансформатора. В разрядном контуре расположено гасящее сопротивление регулируемой величины. Ко вторичной обмотке трансформатора подключен намагничивающий виток.

Баланс энергии при этом

$$\frac{1}{2}CU^2 = \int_0^t I_p^2 R_D dt + \frac{1}{2}(L_{TS} + L_I) I_S^2 + \int_0^t I_S^2 R_S dt + A_m,$$

где I_p — первичный ток;
R_D — первичное гасящее сопротивление;
I_S — вторичный ток намагничивания;
L_{TS} — индуктивность вторичного витка;
L_I — индуктивность намагничивающего витка;
R_S — общее сопротивление вторичного провода;
A_m — магнитная энергия в детали.

Два промышленных аппарата различной величины имеют следующие данные:

M516	M517
$L_I \approx 0{,}2$ *мкгн*	$L_I \approx 0{,}2$ *мкгн*
$L_{TS} \approx 1$ *мкгн*	$L_{TS} \approx 0{,}7$ *мкгн*
$I_p = 500 \div 1\,000$ *а*	$I_p = 700 \div 1\,500$ *а*
$R_D = 2 \div 6$ *ом*	$R_D = 2 \div 6$ *ом*
$^1/_2CU^2 = 400 \div 1\,200$ *вт·сек*	$^1/_2CU^2 = 500 \div 2\,000$ *вт·сек*

Максимально аппарат дает:

M516 — около 35 000 *а*
M517 — около 55 000 *а* (при коротком замыкании 110 000 *а*)

Вычисленный или измеренный при $R_D = 2$ *ом* баланс энергии приведен в табл. 5.

Таблица 5

Аппарат	Заряд, *вт·сек*	Термические потери в гасящем сопротивлении, *вт·сек*	Омические потери в намагничивающем витке и трансформаторе, *вт·сек*
М516	1 200	200	50
М517	2 000	400	100

(частные значения)

Аппарат	Работа намагничивания детали, *вт·сек*	Общая магнитная энергия	
		вт·сек	%
М516	50	900	75
М517	100	1 400	70

Для вторичного намагничивающего контура действительны следующие соотношения:

$$\text{М516}: \frac{1}{2}(L_{TS} + L_1) \cdot I_S^2 = 900 \text{ вт·сек}, \quad L_S = 1{,}2 \text{ мкгн};$$

$$I_S = \sqrt{\frac{900 \cdot 2}{1{,}2 \cdot 10^{-6}}} \approx 38\,000 \text{ а}.$$

$$\text{М517}: \frac{1}{2}(L_{TS} + L_1) \cdot I_S^2 = 1\,400 \text{ вт·сек}; \quad L_S = 0{,}9 \text{ мкгн};$$

$$I_S = \sqrt{\frac{1\,400 \cdot 2}{0{,}9 \cdot 10^{-6}}} \approx 56\,000 \text{ а}.$$

Отсюда видно, что амплитудный ток в намагничивающем витке аппарата М517 сильнее зависит от индуктивности вторичного контура, чем в аппарате М516. Полная схема малого аппарата М516 показана на рис. 119, внешний вид — на рис. 120.

Самые большие работающие по этому принципу аппараты выполнены подобно М517 и имеют конденсаторную батарею до 8 000 *дж*, игнитрон в качестве включателя и ток при коротком замыкании импульсного трансформатора до 400 000 *а* при нагрузке (повышение индуктивности намагничиваемой деталью) от 150 000 до 250 000 *а*. В них могут быть полностью намагничены

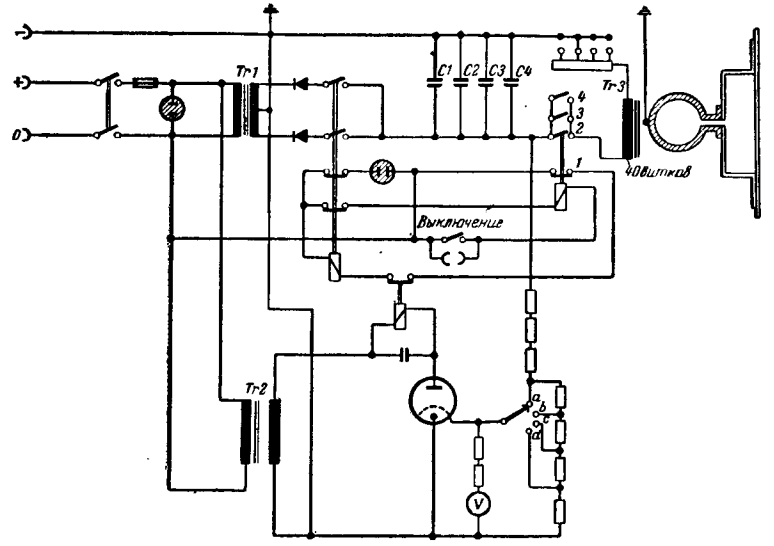


Рис. 119. Схема намагничивающего прибора. Батарея конденсаторов C_{1-4} разряжается через сопротивление на трансформатор *Tr3*. На магнитопроводе, подключенном со вторичной стороны, получают до 50 000 *а*.

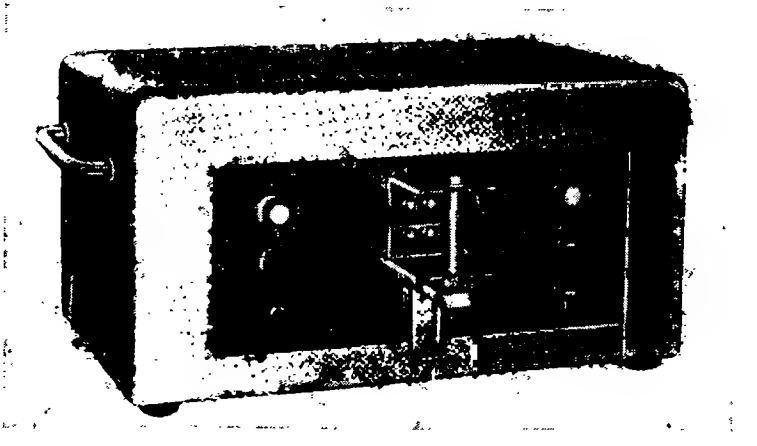


Рис. 120. Намагничивающий прибор с подключенным индуктором для изготовления магнита измерительного прибора с амплитудой тока до 50 000 *а*.

большие весом в несколько килограмм магниты для магнетронов. Минимальную энергию, необходимую для намагничивания детали, получают, исходя из необходимых тока и индуктивности петли намагничивающего провода, так что действительно соотношение

$$\frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}L_m I_m^2.$$

Особое преимущество [Л. 71] импульсного намагничивания состоит в том, что можно безукоризненно на-

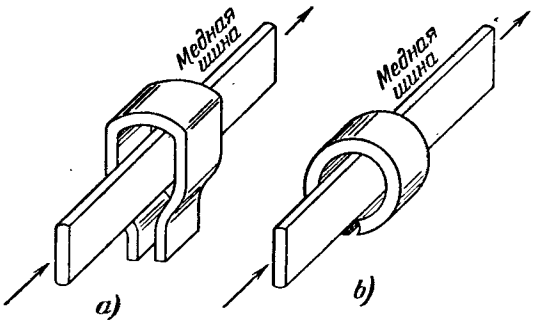


Рис. 121.

а — медная шина импульсного намагничивающего прибора с ферромагнитным управлением магнитным полем вокруг шины для намагничивания призматических магнитов; *b* — медная шина с окружающим ее кольцевым магнитом, который намагничивается импульсом тока.

магнитить даже такие формы магнитов, которые не позволяют осуществить точный подвод намагничивающего потока ярма электромагнита. Это, например, магниты для магнитоэлектрических приборов и магниты счетчиков. Более старые магнитные материалы с относительно большой проницаемостью и малой коэрцитивной силой можно еще намагнитить обычным способом, однако высоколегированные кобальтовые стали создают известные трудности. При этом невозможно распределение потока, соответствующее форме магнита, и магнит остается непостоянным; он неприменим для приборов высокого класса точности. При импульсном намагничивании, напротив, силовые линии расположены концентрично вокруг провода, продетого сквозь кольцевой магнит, и по-

ток равномерно пронизывает магнит (рис. 121). Зазор между полюсами должен быть при намагничивании перекрыт железной пластинкой.

Само собой разумеется, импульсными методами возможно также намагничивание прямых стержневых маг-

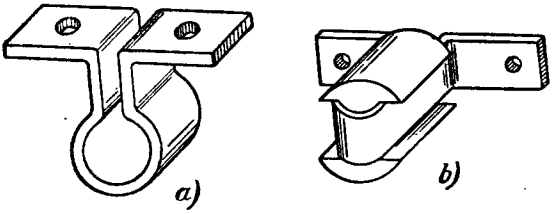


Рис. 122.

a — омегаобразный магнитопровод для намагничивания стержневых магнитов; *b* — двойной Т-образный якорь из высокомагнитной динамной стали с окружающим его магнитопроводом для намагничивания внутренним полем статоров или кольцевых магнитов.

Рис. 123. Магнитопровод для горшочных магнитов, открытый. Токоподвод к намагничивающему витку безындукционным ленточным проводом.

нитов и магнитных систем. При этом необходимо лишь расположить определенным образом проводник тока вокруг магнитов. При известных обстоятельствах можно также работать с кабелем достаточного сечения (обратить внимание на сопротивление согласования!). Лучше использовать соответствующее намагничивающее ярмо,

вокруг которого обводят токоведущую шину. Пример выполнения показан на рис. 122.

При намагничивании ферритных сердечников громкоговорителей пользуются открытым приспособлением (рис. 123), в которое закладывается магнит, окруженный витком импульсного тока. Питание подводится через видимую слева пару ленточных проводов.

I. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ КОНДЕНСАТОРОВ В ЗВУКОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ

1. ПРЕВРАЩЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В принципе можно подвести энергию накопительного конденсатора для превращения в импульсы звуковой энергии ко всякому электроакустическому преобразователю. Широкое применение это нашло в эхолоте. В этом случае энергия конденсатора передается через механический прерыватель или тиратрон к электро- или магнитострикционному вибратору. В последнем случае конденсатор и индуктивность обмотки вибратора образуют колебательный контур; требуется, чтобы электрическая резонансная частота между конденсатором и индуктивностью совпадала точно со звуковой частотой вибратора или была совершенно другой. В первом случае происходит совпадение декремента затухания в колебательном контуре, связанном индуктивно с механической частью — магнитострикционным преобразователем, с декрементом затухания преобразователя; в последнем случае отдача энергии происходит по баллистической кривой; колебательный контур передает энергию в виде импульса для превращения в звуковую механическую энергию, которая затухает затем как колебания колокола. В первом случае необходимо иметь прерыватель с пропусканием тока в обоих направлениях с очень точным замыканием контактов и без явлений вибрации; во втором случае нужно пропускать энергию в одном направлении короткими импульсами, поэтому здесь следует применять тиратрон. Можно создать серию колебаний в наиболее часто применяемой рабочей частоте между 15 и 30 *кгц* с 10 периодами и пиковой (импульсной) мощностью 1 *квт* с по-

мощью заряда конденсатора; более высокие величины не могут использоваться имеющимися в настоящее время преобразователями. Поэтому энергия конденсатора в случае наличия вибратора с частотой 15 *кгц* при продолжительности импульса излучения около 1 *мсек* и мощности 1 *квт* составляет приблизительно 1 *дж*, при учете к. п. д. в данном случае — около 1,5 *дж*.

Так как обмотка состоит из небольшого количества витков, то получают необходимую резонансную частоту при емкости в несколько микрофарад и напряжении заряда 1—2 *кв*. Магнитная проницаемость магнитострикционного преобразователя сильно изменяется в зависимости от намагничивания, так что точно получить путем расчета значение требуемой емкости едва ли возможно. Экспериментально определение емкости проводят так: покрывают вибратор тонким слоем песка и наблюдают при боковом освещении высоту подбрасывания зерен песка при подведении разряда конденсатора. Необходимую величину емкости, не очень точную вследствие затухания, получают при максимальной высоте подброса.

При использовании электрострикционных преобразователей, которые являются сами конденсаторами, необходимо включать между накопительным конденсатором и преобразователем (большей частью это конденсатор из титаната бария) согласующий трансформатор, который подсоединен наподобие полосового фильтра и имеет одинаковую резонансную частоту как в первичной, так и во вторичной цепи.

Если коэффициент магнитной связи равен, например, 0,1, то вследствие индуктивной связи первичные слабо успокоенные колебания передают излучаемую мощность непосредственно в морскую воду, эта мощность на обычных частотах имеет декремент между 0,05 и 0,1. Плотности звуковой энергии и, таким образом, максимальные мощности при применении излучателей из титаната бария не выше, чем у магнитострикционных излучателей, и находятся максимально в пределах 1—10 *вт/см*^{2}, причем прежде всего важно, чтобы излучатель работал в дегазированной воде для предупреждения кавитации, так как при возможной кавитации уже при значениях немного более 1—2 *вт/см*^{2} нарушается контакт между преобразователем и жидкостью и вследствие этого прекращается излучение мощности. За

последнее десятилетие нашли распространение дефектоскопы для металла и бетона, представляющие собой излучатели импульсов высокой частоты с очень малой длительностью импульсов. Здесь не используется непосредственно разряд конденсаторов, а генератор высокой частоты со стабильной частотой с кварцем.

В небольших эхолотах, применяемых на судах, используются большей частью разряды конденсатора.

2. ЗВУКОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ В ВОЗДУХЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ

Дополнительное применение было найдено Брадфильдом. В его ультразвуковом аппарате для слепых использованы разряды конденсатора в количестве 3—4 разрядов в 1 *сек* и продолжительностью 1—1,5 *мксек* в фокусе параболического зеркала. Излучаемый «белый» ультразвуковой спектр отражается от объекта и воспринимается пьезоэлектрическим микрофоном, вмонтированным в другое вогнутое зеркало. Такие приборы полезны для обеспечения безопасности движения и применяются также для автоматического открывания ворот гаражей.

Этот пример показывает использование превращения энергии заряда конденсатора с помощью искровых разрядов в звуковые импульсы.

Треск, получающийся от искры в воздухе, по своему к. п. д. является довольно значительным, так как речь идет о строго адиабатическом процессе излучения звука. Энергия конденсатора превращается в плазме искры в тепло; только незначительная часть теряется в виде излучения света, видимого или невидимого; преобладающая часть переходит в тепловую энергию и в соответствии с основными законами адиабатического расширения превращается в механическую и тем самым акустическую энергию излучения. К сожалению, тот факт, что очень высокие частоты в воздухе и других газах вследствие неидеальных свойств немедленно поглощаются и что высокий процент звуковой энергии искры находится в чрезвычайно высокой ультраакустической области, приводит к тому, что на коротком расстоянии от искры находятся лишь более низкие частоты с невысоким к. п. д. в соответствии с их скромной частью во всем «белом» спектре частот получаемого при искровом раз-

ряде звука. В некотором объеме этот эффект можно устранить, применяя вибрирующий колебательный контур, полупериоды которого каждый раз образуют искровой пробой, так что по разложению Фурье получают в качестве основной частоты двойную частоту искрового пробоя. Это не изменяет, однако, ничего в том, что каждый пробой искры снова вызывает высокие частоты, которые подлежат одинаковой мгновенной абсорбции в непосредственной близости.

Получение ультразвука посредством искрового разряда относится к области термических ультразвуковых генераторов. Если точнее говорить, при этом виде получения звука можно говорить не об ультразвуке, так как под этим понятием понимают обычно определенную частоту, в то время как искровому звуку присущ белый спектр, т. е. не излучается никакой определенной частоты. Поэтому с помощью искровых разрядов можно получить очень высокие максимальные звуковые импульсы, которые никогда нельзя было бы получить обычными средствами, например несколько сотен киловатт максимальной (пиковой) мощности.

3. ПОЛУЧЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ПУТЕМ РАЗРЯДОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Первые исследования [Л. 36] о механическом к. п. д. искровых разрядов в жидкостях провел автор путем динамического подбрасывания тел небольшого веса искровыми разрядами в жидкостях (табл. 6). При этом установлены к. п. д. около 1%, которые, однако, так незначительны вследствие наиболее низкого получаемого когда-либо механико-акустических соответствий между весом груза и плазмой искры. Так как превращения энергии заканчиваются в течение 1 *мксек*, то получают все же за это время интенсивности звуковых импульсов, вызывающие ускорение груза, порядка 10^5 *вт*. Понижение к. п. д. наполовину при включении сопротивления 2,5 *ом* указывает на то, что сопротивление искрового разряда в жидкости при применяемых значениях электрических величин имеет почти ту же величину. Сопротивление предвключенного искрового воздушного промежутка длиной 3 *мм* по формуле Теплера при $K=0{,}8\times\times10^{-3}$ около 0,24 *ом*, чем можно пренебречь. А периодическое предельное сопротивление цепи разря-

Таблица 6

Акустический и механический к. п. д. искровых разрядов в жидкости (из [Л. 36])

C, *мкф*	*U*, *кв*	$1/2CU^2$, *Мвт·сек*	*R*, *ом*	*L*, *мкгн*	Вес, *г*	Высота подброса, *см*	Механическая работа		К. п. д., %
							г·см	*Мвт·сек*	
0,012	18,3	2 000	—	0,2	2	130	260	26	1,3
0,012	18,3	2 000	—	0,2	1,4	170	240	24	1,2
0,067	12,2	5 000	—	0,2	5	100	500	50	1
0,067	12,2	5 000	—	0,2	2	200	400	40	0,8
0,067	12,2	5 000	—	0,2	2	250*	500	50	1
0,07	12,2	5 200	—	0,2	20	25	500	50	0,96
0,07	12,2	5 200	—	0,2	5	150	750	75	1,44
0,07	12,2	5 200	—	0,2	2	200	400	40	0,8
0,07	12,2	5 200	2,5	0,2	2	100	200	20	0,4
0,07	12,2	5 200	—	3	5	100	500	50	0,95
0,07	12,2	5 200	—	82	5	50	250	25	0,47

* Высота помещения.

Каждое из значений является средним из 3—5 отдельных измерений при отклонениях ±20%.

да, вычисленное аналитически, составляет около 3 *ом*, так что значение сопротивления искрового разряда в жидкости близко к наиболее благоприятному для быстрого превращения энергии.

Время от начала искрового разряда до первого значения максимального тока составляет при индуктивности линии 0,2 *мгн* около 0,2 *мксек*, при 82 *мгн* — около 4 *мксек*. За пульсацией тока велось наблюдение с помощью осциллографа. Амплитуда первой полуволны была втрое больше второй полуволны; после этого колебание медленно затухает, так как с каждой прошедшей полуволной тока демпферное (гасящее) сопротивление искры уменьшается.

Процесс механической передачи энергии может происходить только в интервале времени, в котором сопротивление искры велико, и она сама поглощает большую мощность. При рассмотрении влияния *L* создается впечатление, что процесс проходит несомненно медленнее, чем за 0,2 *мксек*, но быстрее чем за 4 *мксек*. При 1 *мксек*

продолжительности протекания процесса получали бы при превращении 75 *Мвт·сек* механическую максимальную мощность 75 *квт*.

Если груз использовать как противоположный электрод и положить тонкую алюминиевую фольгу для предупреждения потери от адгезии, получают такие же к. п. д., как и выше. При прокладке из алюминиевого листа при толщине листа 1—1,2 *мм* не наблюдается снижения к. п. д.; если не уложен груз, то механическая энергия проявляется как работа деформации в виде небольших выступов на листе. При больших толщинах листа снижение к. п. д. происходит внезапно; при толщине 2 *мм* получают едва 0,25%. Удовлетворительное объяснение явления не найдено. Время распространения импульсной волны в алюминии должно быть при этом существенным; тонкий материал не в состоянии создать полную акустическую жесткость, продавливается и переносит импульс на груз, в то время как при более толстой среде вследствие полностью выраженных акустико-механических данных происходит отражение на поверхности алюминий — вода и на груз ничего не передается.

Время прохождения звука туда и обратно в материале толщиной 1,2 *мм* составляет около 0,5 *мксек*.

Деформации тонких металлических листов (по форме они напоминают выступы от удара керном) подтверждают представление о том, что процесс длится около 1 *мксек*.

Как измерил Шаафс [Л. 25], плотности звуковой энергии вблизи искровых разрядов в жидкости так высоки, что вода может быть сжата до плотности 2. Подобное резкое повышение давления до амплитуд 50 000 *ат* вызывает регулярно на соседних поверхностях металла пластические деформации, которые могли бы воспринять существенную часть первоначально полученной пиковой акустической мощности. Руст и Друбба [Л. 37] применили звуковые импульсы сравнительно медленно протекающего разряда в воде для применения в эхолоте. Байлитис [Л. 38] критически отнесся к их экспериментам и нашел, что процесс образования звука может быть вызван при электродах с широкой поверхностью и колебательном возбуждении их посредством искр; при настоящих искровых разрядах в жидкостях находят всегда

только излучения звука в течение нескольких микросекунд.

Для того чтобы предотвратить излучение звуковых импульсов в газ или воздух, следует сначала изучить конструкцию излучателя звуковых взрывных волн, который, между прочим, оказывает пугающее действие на птиц.

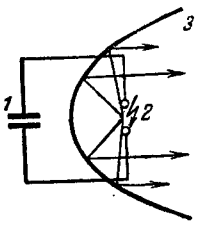


Рис. 124. Разряд конденсатора в искровом разряднике для получения звуковых импульсов.

Согласно рис. 124 электрический конденсатор периодически заряжается, причем он каждый раз после происшедшей зарядки разряжается через электроды *2* в виде искр с треском.

Электроды *2* расположены так, что излучение может быть сконцентрировано в желаемом направлении, а электроды могут быть помещены в фокусе рефлектора *3*. Для получения всестороннего излучения применяют систему электродов согласно рис. 125, при которой электрическая искра, питаемая от конденсатора *1*, проскакивает

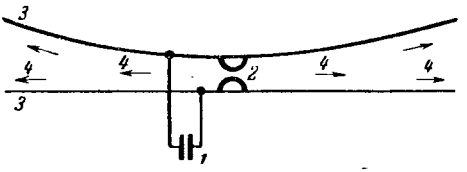


Рис. 125. Система электродов для получения звуковых кольцеобразных импульсов.

между металлическими контактирующими поверхностями *2*, которые помещены в центре соответственно изогнутых листов *3* так, что исходящий от искры звуковой импульс распространяется кольцеобразно в направлении стрелок *4*. Так как контакты *2* образуют электрические искры в атмосферном воздухе, то они подвержены сильному окислению. Лучше всего подходят электроды из спеченных металло-керамических сплавов, таких, как серебряно-вольфрамовый сплав.

С физиологической точки зрения треск и щелчки,

как показывает опыт, могут быть получены, если создают от 1 до 50 искр в 1 *сек*. Заряд конденсатора должен быть по опыту не менее 1/10 *вт·сек*. Обгорание электродов зависит от максимального тока в искре. Максимальный ток в свою очередь зависит от индуктивности в цепи разряда или индуктивности самой этой цепи.

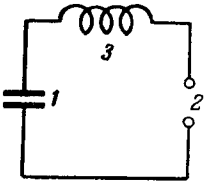


Рис. 126. Разрядная цепь с конденсатором и индуктивностью.

Составляющие частоты выше 100 *кгц* имеют такую небольшую дальность распространения в воздухе, что их получение является нерентабельным, так как часть более высоких частот вследствие поглощения не оказывает действия. Поэтому, как показано на рис. 126, в цепь разряда конденсатора *1* и электродов *2* включается индуктивность *3*. Величину этой индуктивности следует выбрать такой, чтобы согласно рис. 127 для первой полуволны время колебания t соответствовало полуволне желаемой наибольшей частоты излучения.

Пример

Желаемый электрический заряд
для одной искры $1/2CU^2 = 1/4$ *вт·сек*;
емкость конденсатора 10 000 *пф*;
напряжение заряда 7 000 *в*;
индуктивность для предельной частоты 100 *кгц* 1/4 000 *гн* = = 250 *мгн*;
заряд конденсатора $Q = CU = 7 \cdot 10^{-5}$ *а·сек*;
искровое сопротивление первой полуволны $R_F = \frac{Kl}{Q} = 16/7$ *ом*;
при $K = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ пробивной промежуток для 7 *кв* при $l =$ $= 0{,}2$ *см*

Омическое сопротивление индуктивности *3* согласно рис. 126 для предупреждения значительных потерь должно быть меньше, чем сопротивление искры, которое составляет в данном случае 16/7 *ом*. При применении высокочастотной катушки с многожильным проводом можно без особых усилий создать со-

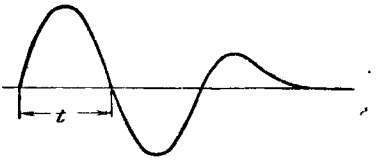


Рис. 127. Осциллограмма разрядного процесса.

противление катушки, равное 0,5 *ом*, которое еще не очень заметно ослабляет образующийся треск, но зато полная звуковая энергия выделяется в области действующей частоты.

Для зарядки конденсатора требуется согласно изложенному выше только небольшая электрическая мощность. Для 500 искр в 1 *сек* потребовалась бы электрическая мощность 50 *вт* при неизбежных потерях при зарядке 100 *вт*, в то время как для еще достаточной частоты искры 1/*сек* необходимо только 1—2 *вт*. Если хотят зарядку конденсатора *1* производить от сети переменного тока согласно рис. 128, то применяют рассеивающий трансформатор *5*, индуктивность рассеяния которого выбрана при конструктивном исполнении так, чтобы при каждой полуволне напряжения происходил только один заряд конденсатора до пробивного напряжения искрового промежутка разрядника.

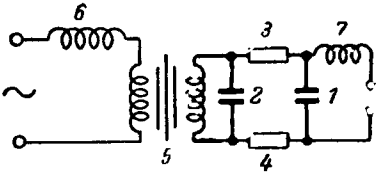


Рис. 128. Схема зарядки конденсатора от сети переменного тока с помощью рассеивающего трансформатора.

Трансформаторы для неоновых ламп подобной конструкции при самых малых размерах образцов, имеющихся в продаже, подходят для этой зарядки. Для экранирования колебаний высокой частоты от вторичной обмотки этого трансформатора включают параллельно ей большой конденсатор *2* и заряжают конденсатор *1* через зарядные сопротивления *3* и *4*. Импульсы напряжения на конденсаторе *1* не передаются на действующий трансформатор, так что обеспечивается полная защита от радиопомех.

4. АНАЛОГИЯ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ВЗРЫВЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

От показанной здесь методики получения импульсов звука в воздухе отличается способ получения их в жидкостях, у которых плотность больше в 10^3 раз и которые в противоположность газам трудно поддаются сжатию.

Существует два вида звуковых генераторов,

Первая группа обратима. Генераторы этой группы излучают звуковые импульсы при подведении электрической или механической энергии и при воздействии на них звуковых импульсов являются источником механической или электрической энергии. К этой группе принадлежат магнитострикционные, электрострикционные, электродинамические и электростатические излучатели, а также излучатели с кварцем.

Вторая группа генераторов работает на основе необратимых процессов. Они не могут быть использованы в качестве микрофонов, как первая группа. Сюда относятся взрывчатые вещества, которые образуют звук вследствие химических превращений. Необратимые излучатели характеризуются тем, что амплитуда давления может быть так высока, что среда, в которой они действуют, не будет иметь постоянную скорость звука; скорость звука в непосредственной близости значительно повышена. Все известные методы так называемой звуковой оптики, т. е. применения акустических линз и зеркал, что является полезным для обратимых излучателей, становятся непригодными, так как отпадают оба условия их работы, а именно постоянная скорость звука и постоянная частота.

Отпадают и рассуждения об интерференции, так как нет минимумов вслед за максимумами, а выравнивание давления происходит крайне медленно. Необратимые источники звука (генераторы звука) могли быть применены до сих пор в технике для получения отдельных интенсивных звуковых импульсов. Только очень слабые источники звука, которые образуют звук не вследствие химического разложения, а при испарении среды, могут быть использованы для повторяющейся работы, например для сигналов небольшой мощности. К этой группе относится также прерыватель Венельта. Для получения сильных звуковых импульсов, как известно, можно применить электрические искры под водой. Однако практического применения эта мысль еще не нашла, несмотря на многочисленные эксперименты с целью улучшения устойчивости и продолжительности импульсов звука.

Если в жидкости, например воде, получить электрический искровой разряд большой мощности, то вследствие быстрого расширения испаряющейся и разложившейся жидкости возникают чрезвычайно сильные звуковые

волны, что часто приводит к разрушению сосуда. При этом может быть превращено до 50% подведенной электрической энергии в механическую энергию звукового поля. При соответствующем расчете самоиндукции и емкости в цепи искрового разряда процесс расширения в искре, сопровождающийся аналогичной волной с давлением, так регулируется, что выполняются определенные требования относительно количества импульсов, а также длительности отдельного импульса.

Применяемый в этом случае конденсатор должен иметь во всех случаях такую величину, чтобы его электрическая энергия $1/2\ CU^2$ при постоянном к. п. д. для выбранного применения ультразвуковой мощности была достаточной для получения каждый раз одного импульса. По выбору можно работать с большей емкостью и меньшим напряжением или наоборот, причем при заданной самоиндукции при одинаковой энергии в конденсаторе можно получить медленный или быстрый процесс искрового разряда. Далее, можно путем изменения самоиндукции делать процесс периодическим, апериодическим или изменяющимся по частоте импульсов. Изменяя величину емкости или самоиндукции, можно оказывать сильное влияние на величину импульсной звуковой волны. Как известно, например, при применении масляных выключателей большой мощности в изолирующих жидкостях, а также в воде при использовании вспомогательных искровых разрядников искра быстро гаснет и можно получить большое количество импульсов за единицу времени без образования дуги. Если жидкость дополнительно подвергнуть давлению, то серия искр может быть увеличена.

Характер импульсной волны можно также изменить в зависимости от электролитической проводимости среды: при хорошей проводимости (1—10% соли в воде или $P_н$ около 3—5) получаются более жесткие импульсы, чем, например, при применении водопроводной воды.

Учитывая, что импульс при генерировании ультразвуковых импульсов должен иметь максимальную энергию и быть кратковременным, можно привести следующий пример соотношения величин: мощность ультразвуковых импульсов 10^4 *вт*; данные контура: зарядная емкость 0,5 *мкф*, зарядное напряжение 10 *кв*, самоиндукция 0,5 *мкгн*.

Расчет ультразвуковых импульсов при подводном искровом разряде. Как показывает опыт, напряжение и емкость для получения подводного искрового разряда длиной около 1 *мм* составляют соответственно около 20 *кв* и $2 \cdot 10^{-8}$ *ф*. Тогда энергия этой искры

$$\frac{CU^2}{2} = \frac{400 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{2} \text{ вт} \cdot \text{сек} = 4 \text{ вт} \cdot \text{сек}.$$

Можно, например, рассчитать для искры с энергией 4 *вт · сек* при питании от сети переменного тока через трансформатор и частоте 100 искр в 1 *сек*; затрачиваемая мощность должна быть около 500 *вт*. Знание закономерностей подводных взрывов может служить хорошим отправным пунктом (как с качественной, так и с количественной сторон) для физики искр в воде и их звуковых волн. Так как при взрыве 1 *г* взрывчатого вещества освобождается около 1 000 *кал* (соответственно около 4 000 *вт · сек*), то одной искре с энергией 4 *вт · сек* соответствует энергия взрывчатого вещества весом около 1 *мг*; это представляет собой по объему шарик с диаметром около 1 *мм* при удельном весе взрывчатого вещества 1,6. В объеме шарика после взрыва создается температура около 2 100° С. На вопрос, сколько калорий должно быть сообщено такому же объему воды, чтобы довести его до такой же высокой температуры, проделаем следующий расчет.

Принятый объем воды 0,6 $мм^3$ (при весе воды $0{,}6 \cdot 10^{-3}$ *г*). Для нагрева этого объема воды от 20 до 341° С (критическая температура) потребуется

$$321 \text{ кал/г} \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-3} \text{ г} = 190 \cdot 10^{-3} \text{ кал}.$$

Превращение этого объема в пар:

$$539 \text{ кал/г} \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-3} \text{ г} = 330 \cdot 10^{-3} \text{ кал}.$$

Нагрев пара от 341 до 2 100° С:

$$1\,759 \text{ кал/г} \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-3} \text{ г} = 540 \cdot 10^{-3} \text{ кал}.$$

Коэффициент 0,5 — средняя удельная теплота пара. Если суммировать три полученных выше значения расхода тепловой энергии в калориях, то получим общие затраты тепла около 1 *кал*, что соответствует около 4 *вт · сек*.

То есть при искре с энергией разряда 4 *вт · сек*, очевидно, будет такое же действие, как при взрыве 1 *мг* взрывчатого вещества. Так как плотность воды не очень

отличается от плотности взрывчатого вещества, то можно принять, что явления, происходящие в момент времени, когда газовый пузырь достигает этого диаметра, в значительной степени подобны явлениям взрыва взрывчатого вещества. Остается узнать, теряется ли существенное количество энергии за предшествующее время из области искрения. Кроме видимых и ультрафиолетовых лучей, вся энергия остается в области искрового пузыря, и до сих пор нет основания предполагать, что более чем $\frac{1}{10}$ часть энергии излучается дальше. Даже при интенсивных искровых разрядах в газах согласно современному представлению можно пренебречь потерями на излучение в первой стадии. Согласно этому можно ожидать грубого количественного соответствия между процессами во взрывчатом веществе и искре в воде, поэтому результаты для первого случая в последующем будут кратко изложены.

Пока в области пузыря (взрывчатое вещество) еще имеется давление $(1 \div 8) \cdot 10^4$ *ат*, вода в граничной области еще может хорошо сжиматься. Поэтому в ней образуется крутая волна давления, которая распространяется со сверхзвуковой скоростью.

Из опыта больших взрывов известно, что эта волна давления, а также следующие позже меньшие волны давления содержат около 15% общей энергии, в то время, как при меньших взрывах необходимо принимать в расчет бо́льшую часть, но, вероятно, едва ли больше, чем 30%. В приведенном выше примере при 100 искрах в 1 *сек* можно было бы ожидать долю звука в 50—60 *вт*, которая распространяется довольно равномерно с шаровой симметрией. После нескольких сантиметров пути звуковые волны с достаточным приближением могут быть описаны известными законами звука. Взрывные волны можно грубо считать волнами давления с диаграммой треугольника с таким крутым фронтом, что его ширина меньше $\frac{1}{10}$ общей длины волны.

При выбранной здесь системе измерения можно представить амплитуду соответствующих волн давления в следующем виде:

$$P_{\text{макс}} \approx 540\,(\text{кГ} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{кал}^{-1/3})\,\frac{\sqrt[3]{E}}{r},$$

где E — освобожденная энергия, а r — расстояние от центра.

При удалении от искры на 10 *см* следует ожидать максимального давления, равного около 50 *ат*. Продолжительность одной такой волны давления следующая:

$$t \approx 0{,}3 \cdot 10^{-6} (сек \cdot кал^{-1/3}) \sqrt[3]{E}.$$

Для приведенного выше примера $t = 0{,}3 \cdot 10^{-6}$, что одновременно свидетельствует об основной частоте $3 \cdot 10^6$ *гц*. Это дает право сказать нам, что это ультразвук.

Из формул следует, что собственная частота или продолжительность волны давления изменяется только в зависимости от корня третьей степени из энергии искры, которая у подводной искры лишь с трудом может быть изменена. Амплитуду, однако, можно очень легко изменять изменением расстояния.

Важный основной закон акустики позволяет получить скорость частиц (колебательную) $P = ucp$, где P — давление звука; c — скорость звука и колебательная скорость и ρ — плотность среды в системе CGS.

Для звукового давления, например, 50 *ат* (около $50 \cdot 10^6$ *дин/см*^{2}) по приведенной выше формуле колебательная скорость $u = 330$ *см/сек* — величина, которая совершенно мала по сравнению со скоростью звука c, равной $15 \cdot 10^4$ *см/сек*, и тем самым оправдывает акустическую теорию.

Было сказано, что может быть достигнуто значение звуковой мощности 30 *вт*, но она распределяется по шаровой симметрии. При использовании конического объема с углом раскрытия 60° имеют только 1/30 мощности, т. е. 1 *вт*.

В примере длина волны в воде составляет 0,5 *мм*; это означает, что переходная мембрана может быть по толщине не более 0,05 *мм*; это обусловливает, что она может быть применима только на некотором расстоянии, так как она может быть легко разрушена.

Хорошего использования энергии можно ожидать, когда озвучиваемая среда расположена вокруг искры, т. е. является жидкой или квазижидкой. Наконец, следует рассмотреть еще величины импульсов.

У взрывчатого материала наблюдался следующий импульс на единицу поверхности:

$$2{,}5 \cdot 10^2 \, (г \cdot сек^{-1} \cdot кал^{-2/3}) \frac{E^{2/3}}{r} \text{ (см. [Л. 563])}.$$

Общий импульс поверхности сферической волны давления растет, таким образом, пропорционально величине r. На расстоянии 1 *мм* для примера с 1 *мг* взрывчатого вещества значение общего импульса следующее:

$$\frac{2{,}5 \cdot 10^2 \cdot 4\pi}{0{,}1} \approx 3 \cdot 10^4 \; см \cdot г/сек.$$

5. ЗВУКОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ ОТ ИСКР В ЖИДКОСТЯХ И ИХ ФОКУСИРОВАНИЕ

Так как действие искры в жидкостях, звуковой импульс которых зависит от емкости и самоиндукции в разрядном контуре, по характеру звука при малых самоиндукциях подобно взрыву малых количеств взрывчатых веществ, то металл электрода расплывается, а именно тем более, чем он тверже. Г. Руст [Л. 37] уже пытался укрепить электроды на резине, чтобы замедлить разрушение. Звуковой импульс действует, однако, сначала на поверхность металла и только через несколько микросекунд на обратную сторону электрода, так что срок службы остается незначительным. Существенное повышение продолжительности существования получают при расположении согласно рис. 129 (Байлитис и Фрюнгель). Электрод *1* состоит здесь из эластичной ме-

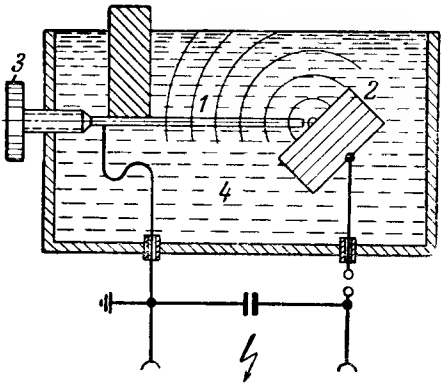


Рис. 129. Схема получения искры в воде; конденсатор разряжается через эластичный электрод *1*, установка которого по отношению к металлической пластине *2* в электролите *4* регулируется винтом *3*. В разрядную цепь необходимо включать добавочный искровой разрядник.

таллической пластинки, например полотна пилки лобзика, в то время как противоположный электрод *2* может быть из куска более мягкого металла, например латуни или меди. Установка электрода *1* по отношению к поверхности *2* производится с помощью установочного винта *3*, который монтируется доступным с наружной стороны. Жидкость, в которой получают искры, обозначена цифрой *4*. Легкая пружинящая пластинка ритмично колеблется при каждом звуковом импульсе в звуковом поле; так как ее масса очень незначительна, то не происходит разрушения, в то время как более массивный другой электрод *2* в некоторой степени может воспринимать работу пластической деформации.

На этой установке можно получить около 20 000 искр, не меняя электродов, при напряжении конденсатора 7—9 *кв*, индуктивности контура около 1 *мкгн* (1 *м* коаксиального кабеля) и значениях емкости 0,01—0,05 *мкф*.

Источники звука этого рода в принципе излучают только сферические волны. Так как речь идет не об обратимом процессе, а каждый импульс следует рассматривать как отдельное явление, то была сделана попытка фокусировки путем установки вогнутого зеркала. Однако оказалось, что отраженный плоский фронт обгоняет сферический фронт импульса, так как акустические пути отраженного и прямого лучей от разрядника в фокусе до объекта различны по длине. Лучшую фокусировку ударной волны получают с помощью акустической линзы. В этом случае вследствие различной скорости звука в материале линзы по сравнению, например, со скоростью в воде получают желаемую плоскую ударную волну с плоской стороны линзы. Рассуждения об интерференции не имеют смысла, так как у импульса практически совершенно плоский минимум, что не дает интерференции. Упомянутые выше соображения были осуществлены на установке, подобной по форме медицинской ультразвуковой головке, которая изображена на рис. 130. Здесь *1*, *2* — искровой разрядник в жидкости, регулируемый с помощью установочного винта *3*. Он находится в жидкости *4* и может в данном случае быть под большим давлением, причем внизу «звуковой головки» установлена звуковая линза *5* для создания параллельных лучей.

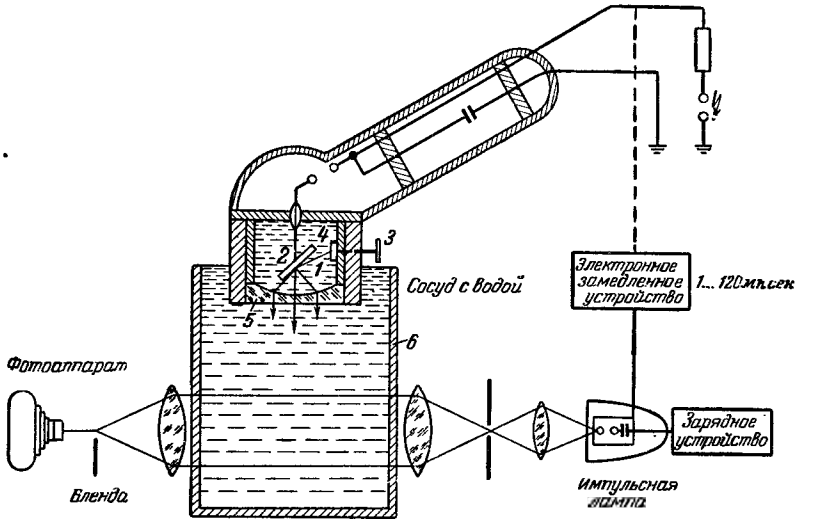


Рис. 130. Выполненный в виде звуковой головки жидкостный искровой разрядник для съемки звуковых волн с помощью искры.

1 — упругая металлическая пластинка — электрод; *2* — противоположный электрод; *3* — установочный винт; *4* — жидкость; *5* — акустическая линза; *6* — стенка, покрытая звукопоглощающим материалом.

Чтобы не нарушить звуковое поле, стенка водяного бачка выложена поглощающим материалом *6*, который улавливает боковое излучение. На электрод *2* подаются импульсы высокого напряжения от конденсатора через проходной изолятор и разрядник. Вместо линзы из плексигласа можно применять линзы из жидкости со скоростью звука иной, чем в воде, и изготовлять их таким образом, что жидкость под давлением вводится между двумя тонкими пластинками. Можно изготовить двояковыпуклую линзу с жидкостью заданной кривизны с заданным коэффициентом преломления. В качестве жидкости для линзы пригоден, например, четыреххлористый углерод с удельным весом 1,58 *г/см*^{3} (скорость звука 920 *м/сек*). На рис. 130 показано также устройство для фотосъемки звуковых волн [Л. 41].

6. ИСТОЧНИКИ ЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Дальнейшим развитием излучателя искр в жидкости является замена одного или двух электродов самой жидкостью.

Если оба электрода, имеющие большую площадь поверхности, отделить друг от друга стенкой из изолирующего материала и в стенке сделать щель или отверстие, то при разряде конденсатора там возникает мощная яркая искра, которая через щель проникает глубоко в жидкость. Здесь существенно то, что искре не нужно доходить до электрода, так что расстояние между обоими электродами может быть изменено в широких пределах.

Проходящий здесь процесс можно было бы истолковать следующим образом: по зажигании разряда напряжение между обеими областями жидкости возрастает до полного напряжения конденсатора. Газовый слой внутри щели или отверстия ионизирован. Ионы газа, соприкасающиеся с жидкостью, отдают свою энергию ионизации молекулам жидкости, так что возникает скачкообразное изменение проводимости электролита возле щели. Как показывает наблюдение, проводимость при тесно ограниченных, часто беспорядочно разветвленных путях нарастает лавинообразно внутри жидкости, как это обычно бывает при искровых разрядах. Дли-

на пути искры в жидкости зависит от энергии разряда. Из этого эксперимента следует теория по изготовлению искрового разрядника в жидкости с большой продолжительностью работы. Оба слоя жидкости должны быть разделены тонким газовым или паровым пространством, причем разрешается оба пространства соединять длинными тонкими каналами в виде трубок. Необходимый слой газа или пара может быть получен различным образом. Можно применить, например, конструкцию, известную как прерыватель Венельта [Л. 77]. В начальной стадии среда в отверстии или вблизи штифта превращается в пар.

В противоположность процессу Венельта, при котором ток прерывается, если энергия разряда хорошо выбрана, наступает повышение проводимости, так что длинные пути искр от штифта или отверстия проходят глубоко в жидкость, что приводит к значительному возрастанию акустического к. п. д. Можно также применить известный по излучателям звука с испарением метод, представляющий собой параллельное включение нескольких прерывателей Венельта. Удается при соответствующем выборе энергии разряда создавать искровой разряд в нескольких отверстиях или на нескольких штифтах при хорошем акустическом к. п. д. Известная из излучателей звука с испарителями диафрагма, которая до сих пор должна была по существующей теории изготовляться из твердого, преимущественно керамического материала, по предложению Байлитиса изготовляется из пластичного или упругого или одновременно упругого и пластичного материала в противоположность применявшемуся до сих пор хрупкому, чувствительному к разрушениям материалу и одновременно вместо модуляций напряжений, обычных для излучателей звука, применяются сильные импульсные разряды конденсатора. После мгновенного испарения жидкой среды в порах диафрагмы самопроизвольно возникают искровые разряды в большом количестве, протекающие одновременно, и с большим к. п. д. распространяются в воде или другой среде. Вследствие того факта, что при достаточно быстром приложении энергии, например за время порядка нескольких микросекунд, среда в порах диафрагмы испаряется, а времени для расширения пара недостаточно, он имеет плотность первоначальной жид-

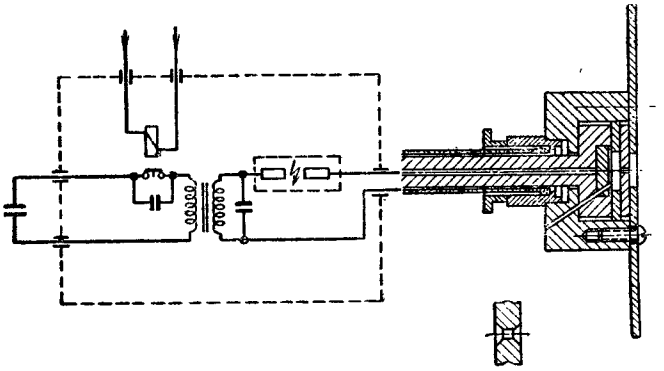


Рис. 131. Излучатель звуковых импульсов для получения искр через отверстия по Байлитису — Фрюнгелю для импульсной энергии 2—50 *вт · сек.*

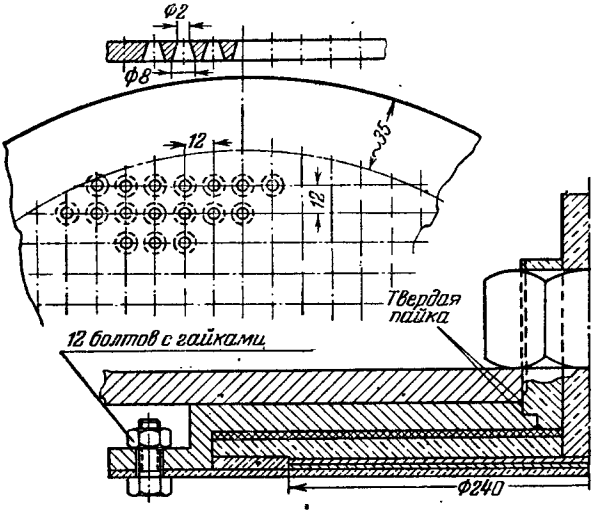


Рис. 132. Излучатель звука (сечение) с большим количеством отверстий для получения импульсной энергии до 1 000 *дж.* Предназначен для применения в морской воде.

кости. Вследствие этого у него в отношении звука такие же свойства, как у жидкости, из которой он испаряется. Вследствие чрезвычайно быстрого нарастания энергии и импульса напряжения эту фазу пара, как только она возникла, пробивает электрическая искра со своей основной энергией и доводит ее до чрезвычайно высоких температур при очень крутом нарастании давления, которое распространяется адиабатически в виде волны давления в окружающей жидкости, образующей один или оба электрода системы.

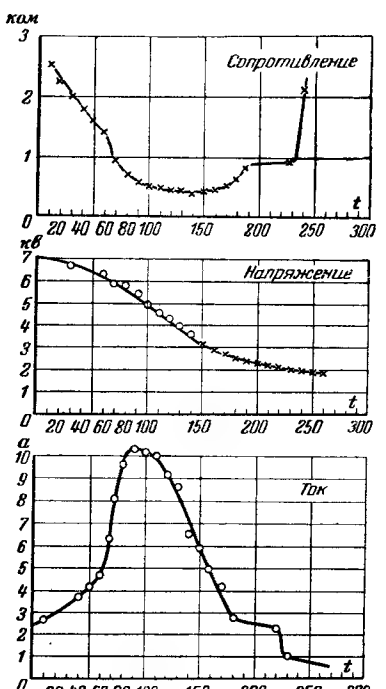


Рис. 133. Изменения в зависимости от времени сопротивления, напряжения и тока в излучателе, показанном на рис. 131, при энергии разряда около 10 *дж*.

С физической точки зрения этот эффект, который открывает много конструктивных возможностей, обусловлен тем, что in statu nascendi все параллельно включенные искровые разрядники имеют еще одинаковые начальные условия, т. е. у всех электролит начинает разлагаться, возникает миниатюрная газовая атмосфера, которая воспринимает и далее энергию разряда конденсатора, и образуется много малых частичных искр. Конечно, они различны по величине, однако на практике можно достичь того, чтобы они были достаточно одинаковыми. С помощью излучателя получают при таких искровых разрядниках максимальную мощность 30 *квт*, например при разряде конденсатора емкостью 0,2 *мкф* и 6—8 *кв* при времени разряда 10—1 000 *мксек*. На рис. 131 показана конструкция этого излучателя, а на рис. 132 представлен излучатель, имеющий большое ко-

личество отверстий. На рис. 133 показаны кривые зависимости от времени тока, напряжения и сопротивления у излучателя, показанного на рис. 131.

7. КОНСТРУКЦИЯ И МЕТОД РАБОТЫ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С БЕЛЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ СПЕКТРОМ

Импульсный генератор (в виде так называемого генератора с отверстиями) большой мощности имеет сравнительно медленный ход разряда и применяется преимущественно для работы под водой; применяя скользящий искровой разряд между электродами, можно изготовлять искровые разрядники с большим сроком службы, если один из электродов изготовлять упругим (например спиральная пружина), а другой — очень твердым (например из инструментальной стали). Такие разрядники имеют такое же резкое нарастание давления, как и при прямых подводных разрядах более высокого напряжения; максимум давления — в зависимости от проводимости воды — достигается в течение времени от 0,1 до 1 *мксек*. [Л. 78]. Существуют различные виды точечных и кольцевых вибраторов, с помощью которых можно получить при серии 50 импульсов в 1 *сек* энергию 4 *дж/имп*, т. е. 200 *вт* средней мощности.

В случае необходимости многие из этих источников звуковых импульсов могут использоваться параллельно для получения желаемой диаграммы. Спектр может охватывать диапазон 0—1 *Мгц*. Практически особенно зарекомендовали себя установки с белым спектром 0—100 *кгц* для целей обезжиривания и стерилизации. Также и в биологии могут быть найдены новые области применения этих источников звуковых импульсов; они в противоположность ультразвуку с периодическими колебаниями практически генерируют только положительные волны давления.

Генератор звуковых импульсов в виде мундштука кабеля, имеющий наружный диаметр, равный только 5 *мм* для введения в шланги с целью стерилизации, оказался практически пригодным для применения в молочной промышленности для эффективного уменьшения количества колоний бактерий. Этот маленький источник звуковых импульсов образует искры, температура кото-

рых должна быть еще исследована спектральным методом.

Источник ультразвука с 10 отверстиями в пластинке для облучения ванн был изготовлен при средней акустической мощности его 200 *вт*, величине 12×20 *см* и максимуме звукового импульса, равном 300 *квт*. В процессе работ с целью сфокусировать сферическое излучение звуковых импульсов было исследовано теневым методом влияние акустических вогнутых линз из плексигласа и выпуклых линз из четыреххлористого углерода на звуковое поле. Звуковые волны снимались при использовании электронного устройства для задержки импульсов при установленной серии снимков 200 000 за 1 *сек* [Л. 79].

Так как звуковые импульсы имеют только положительные максимумы давления, а отрицательное уравнивание идет медленно, то отпадает вопрос об интерференции. Звуковые волны могут быть по желанию направлены в виде параллельного фронта или сконцентрированы в фокусе с помощью линз.

При прохождении двух фронтов волны в момент их встречи образуется зона искажений, которую можно отнести за счет высокого давления. Эта область не оказывает влияния на дальнейшее прохождение волн.

Способность импульсных волн к неограниченной фокусировке излучения дает возможность получения звукового излучения с малым рассеянием, почти параллельными лучами.

При пространственной последовательной установке одновременно вступающих в действие искровых разрядников получают частоту в зависимости от угла с декрементом $D=1/n$, где n — число искровых разрядников [Л. 80].

При положительной полярности импульсного электрода в электролите образуется озон, а при отрицательной полярности образование озона очень незначительно.

8. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Применение аппаратуры для обработки звуковыми импульсами семенного материала состоит в том, что семена помещаются в сосуд из пластмассы, по возможности увлажняются и этот сосуд облучается затем источниками звуковых импульсов.

В то время как высота амплитуд звуковых волн определяется, например, расстоянием от источника звука до пластмассового сосуда, общая доза облучения определяется подсчетом звуковых импульсов. При экспериментах особенно эффективным оказалось применение электрических величин на отверстие 0,2 *мкф* и 8 *кв*.

Семена, находившиеся в пластмассовом сосуде на расстоянии 5 *см* от источника звука и облучавшиеся импульсами звука при количестве импульсов 10—40, не были повреждены. Из облученных семян (салат, редиска, сахарная свекла и др.) были получены опытные растения, которые развивались гораздо быстрее, чем растения из необлученных семян. Одновременно можно было наблюдать и сокращение вегетационного периода.

Приблизив облучаемый материал к источнику звука на расстояние до 1 *см* и тем самым повысив эффективную амплитуду импульсных звуковых волн, получают чрезвычайно сильное воздействие, разрушающее клетки. Это может быть использовано для стерилизации облучаемого материала. В зависимости от целей применения источнику звука придают определенную форму. Если, например, нужно стерилизовать внутреннюю поверхность шлангов, как это следует делать при использовании шлангов в доильных аппаратах после каждого доения, то источник звука выполняется таким, чтобы он мог быть помещен внутри шланга.

Бактерицидное действие источника импульсных волн может быть усилено, если выбрать положительную полярность источника звука. Непосредственно вблизи этого электрода образуется большое количество озона — около 1 *г* озона на каждые 25 *вт·ч*. Если, кроме этого, облучаемая жидкость имеет кислый характер, то продолжительность существования получающегося озона такова, что наступает дальнейшее стерилизующее действие.

Если это дополнительное образование озона по каким-либо причинам нежелательно, то возникающий озон можно отделить пластмассовой или иной тонкой перегородкой между облучаемым материалом и источником звуковых импульсов от облучаемой жидкости.

Электрическая схема простого генератора звуковых импульсов показана на рис. 134. Небольшой трансфор-

матор в схеме удвоителя напряжения используется для получения около 5 *кв* выпрямленного постоянного напряжения, которым конденсатор емкостью до 0,5 *мкф* заряжается до 4,2 *кв*. Искровой разрядник *1* зажигается при этом напряжении, а энергия конденсатора проходит по первичной обмотке импульсного трансформатора, за-

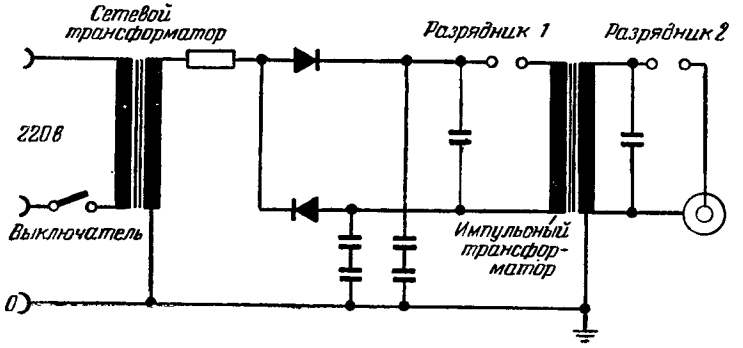


Рис. 134. Электрическая схема генератора звуковых импульсов. Энергия разряда накопительного конденсатора (0,5 *мкф*; 4,2 *кв*) подается через искровой разрядник *1* в первичную обмотку импульсного трансформатора; вторичная обмотка подает толчкообразное напряжение импульсного конденсатора (0,04 *мкф*; 6,5 *кв*) к искровому разряднику *2;* на конце подсоединенного коаксиального кабеля возникает искра в жидкости.

ряжая во вторичной цепи конденсатор емкостью 0,04 *мкф* до 6,5 *кв*. Искровой разрядник *2* при этом пробивается, импульс разрядки проходит в изображенный концентрическими окружностями кабель, на конце которого находится источник звуковых импульсов. Особым преимуществом является то, что сумма токов на вторичной обмотке трансформатора должна быть всегда равна 0, так что не могут происходить гальванические повреждения электродов источника импульсных звуковых волн.

Следует обратить внимание на простоту конструкции аппарата.

На рис. 135 показан внешний вид биологического аппарата для звуковых импульсов; слева так называемый искровой кабель с диаметром наконечника, равным всего 5 *мм*.

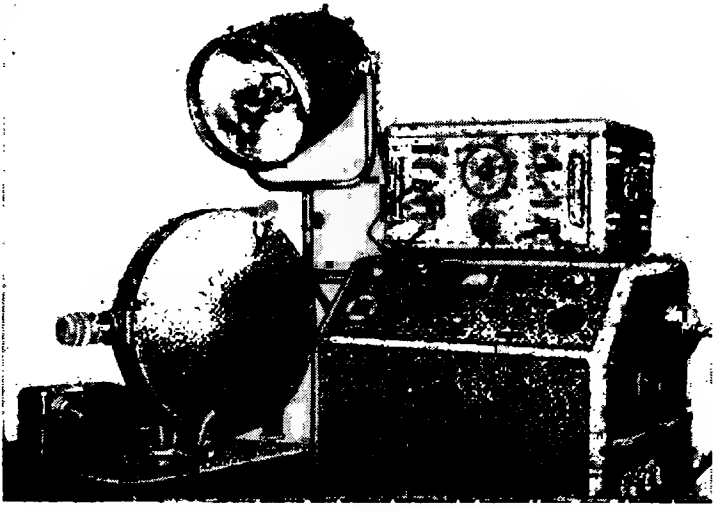


Рис. 135. Аппарат для получения звуковых импульсов (5 разрядов в 1 *сек*; 1 *вт · сек*).

9. ПОДВОДНЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯД КАК ИСТОЧНИК ВСПЫШЕК СВЕТА БОЛЬШОЙ СИЛЫ

Применение подводного искрового разряда в качестве источника света с непрерывным ультрафиолетовым спектром уже давно известно в спектроскопии [Л. 39]. В этом случае речь идет о применении быстро следующих один за другим сравнительно слабых разрядов. Пригодность в качестве источника света большой интенсивности отдельных мощных разрядов конденсатора емкостью 6 *мкф*, заряженного до 25 *кв*, исследовали недавно Эрли и Мартин (Мичиганский университет, Энн Арбор) [Л. 40]. Между двумя установленными на расстоянии 1,5 *см* электродами натягивается проволочка диаметром около 0,02 *мм*, так что разряд конденсатора проявляется сперва как взрыв проволоки. Через полученный таким образом в определенном положении канал может протекать затем основное количество энергии конденсатора.

По измерениям показателя преломления воды, измененного вследствие движения волны при разряде под

водой, и плотности воды можно сделать вывод, что давление внутри цилиндрической, отходящей от разрядного канала волны давления составляет около 5 000 *ат*. В свете, излучаемом при подводном искровом разряде в интервале 3 400—6 900 Å, не наблюдается линейчатого спектра. Если предположить, что идет речь об излучении черного тела, то температура будет составлять более 30 000° К. Для многих целей продолжительность светового импульса, равная 24 *мксек*, слишком велика. С помощью искусного приема удалось снизить продолжительность до 2 *мксек*: заставляют волну давления подводного искрового разряда раздробить стеклянную пластинку, так что мелкие, как песок, осколки большей частью вновь преграждают путь для света.

Все устройство называется «shatter shutter».

То, что количества света, излучаемого мощным подводным искровым разрядом, достаточно для выполнения многих целей, следует из эксперимента, при котором поставленный перед искровым разрядником перфорированный экран представляет собой практически точечный источник света. Проходящего через это отверстие количества света было достаточно, чтобы заснять в виде тени предмет на пленку, удаленную от диафрагмы на расстояние 8,7 *м*. На пути света не было линзы.

10. ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЛНЫ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ИЗМЕРЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Как изложено выше, импульсная волна подводного искрового разряда механически подобна микровзрыву. Преимущество, однако, состоит в том, что она может быть повторена в необходимом количестве.

При оптическом методе измерения напряжений часто имеется необходимость изучать снимки импульсной волны через различные промежутки времени. На рис. 136 показана серия таких снимков. К стержню из плексигласа подводится справа импульс быстро нарастающего искрового разряда в жидкости. Одновременно через устройство задержки включается вспышка лампы молнии со временем вспышки 1 *мксек*. Импульс повторяют, и через каждые два снимка время задержки, т. е. время между началом импульса и его съемкой, удлиняют. На пяти снимках показана импульсная волна через 0, 15,

Рис. 136. Импульсные волны на полосе плексигласа; пять следующих друг за другом состояний. Импульсная волна была получена путем искрового разряда в жидкости.

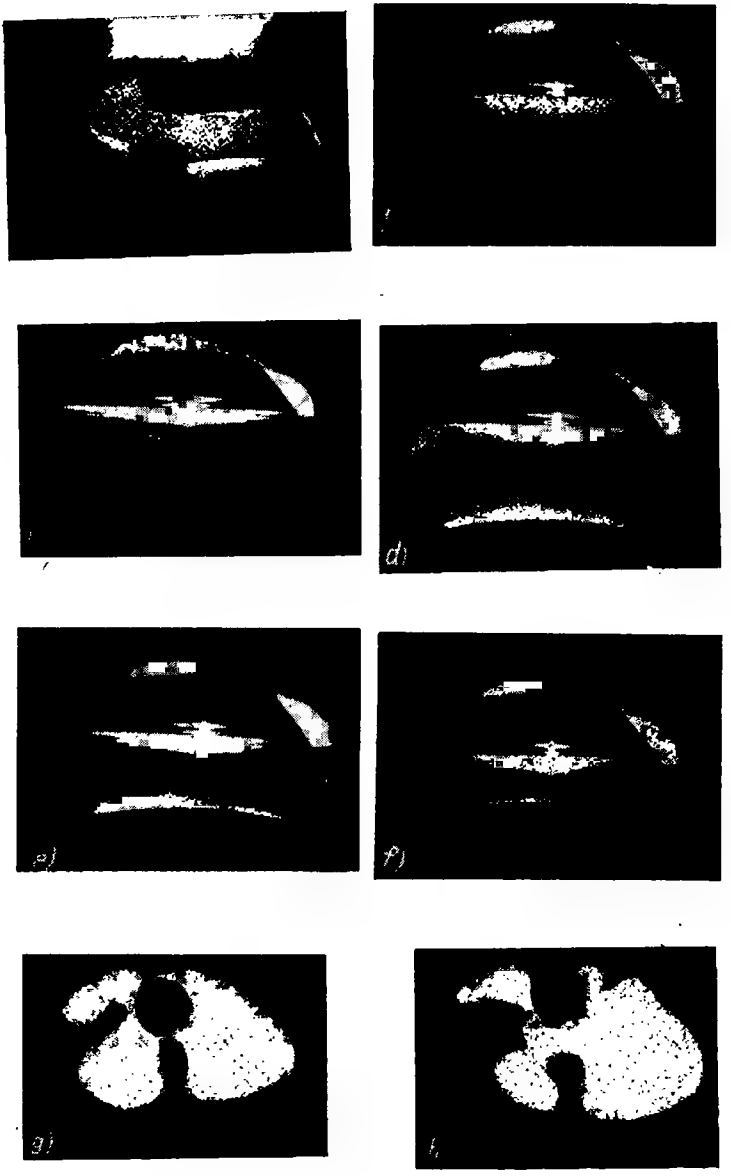


Рис. 137. Снимок импульсной волны в плексигласе. Импульс звука попал на отверстие (большое черное пятно). Снимок отверстия остался в проходящей импульсной волне.

50, 70 и 100 *мксек*. Каждый раз здесь показана другая импульсная волна, но вследствие равенства энергии всех импульсов и одинаковом месте приложения импульса без разрушения объекта может быть снят практически целый фильм с изменением времени задержки на отдельных снимках [Л. 41]. Аналогично этому на рис. 137 показан такой процесс на круглом диске из плексигласа с отверстием. Приходящий от центра снимка импульс распространяется кругообразно. Отверстие в пластине показано, как не имеющая усилий теневая фигура в импульсной волне, только оно медленно наполняется механическими напряжениями, вызванными силой удара.

К. ПОЛУЧЕНИЕ ВСПЫШЕК СВЕТА С ПОМОЩЬЮ НАКОПЛЕННОЙ В КОНДЕНСАТОРАХ ЭНЕРГИИ

1. СКОЛЬЗЯЩИЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯД

Вследствие ионизации, необходимой для образования электрической искры, каждый искровой разряд связан с излучением света. Для получения наибольшего значения световой энергии при разряде следует соблюдать обычные правила электротехники в отношении взаимного соответствия элементов разрядного контура. Среди искровых разрядов, имеющих хорошую световую отдачу, можно различать три вида: скользящий разряд, капиллярный разряд, стабилизированный стенками, и свободный искровой разряд в атмосфере или искровых камерах.

Простой скользящий искровой разряд заслуживает внимания с точки зрения светового излучения при очень экономных экспериментальных средствах. Для ясности изложения приведем здесь отрывки из работы Теплера [Л. 42] за 1908 г. «Для того, чтобы увидеть звуковую волну с помощью известного теневого метода, вслед за излучающим звук искровым разрядом через короткое время должен следовать второй разряд, осветительный разряд в соответствующем месте экспериментального приспособления. Разница во времени между обеими искрами должна быть для данной установки по возможности постоянной, но при необходимости легко изменяемой. Используемая для освещения интенсивность света

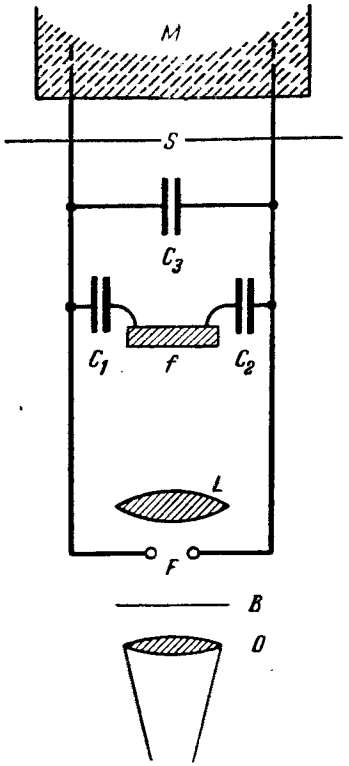


Рис. 138. Установка для фотографирования теневым методом по Теплеру.

C_3 — конденсатор для искрового разрядника F, излучающего импульсные волны; C_1, C_2 — заряжаемые импульсным напряжением конденсаторы для осветительного искрового разрядника со скользящим искровым разрядом. Свет от f проходит через линзу L на диафрагму B; теневые изображения искр разрядника F наблюдаются с помощью окуляра O.

осветительного разряда должна быть по возможности велика. Очень простая экспериментальная установка, которая до некоторой степени отвечает упомянутым требованиям, приведена в работе моего отца; рекомендуемая ниже установка по простоте аналогична вышеупомянутой, но превосходит ее в значительной степени по освещенности.

Большая яркость и легкая установка скользящего искрового разряда делают его ценным вспомогательным средством для сильного и притом очень кратковременного освещения. Скользящие искровые разряды на стеклянных пластинках, покрытых проводящим слоем с обратной стороны, могли быть использованы мною с успехом для превращения звуковых волн в видимые. Однако требуемую разницу во времени между первичным искровым разрядом (звуковой искровой разряд) и скользящим искровым разрядом (осветительный разряд) можно получить только с помощью довольно больших вспомогательных средств. С помощью скользящего искрового разряда на полупроводниковых стержнях, напротив, удается получить видимость простейшими, имеющимися в каждой школьной лаборатории средствами.»

Экспериментальная установка. Для того чтобы обеспечить проведение эксперимента в школьных условиях,

ниже дается подробное описание установки и приводятся все размеры (рис. 138, 139 и 140), где M — источник тока. Машины влияния с двумя вращающимися дисками дают при нормальной скорости вращения и значении емкости, приведенной ниже, каждую секунду приблизительно по одному разряду; индуктор при каждом раз-

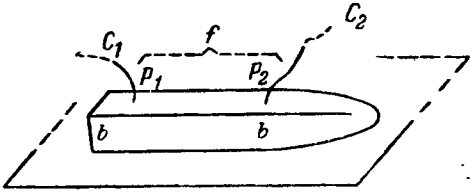


Рис. 139. Простое исполнение искрового разрядника скользящей искры в виде сырого куска мела.

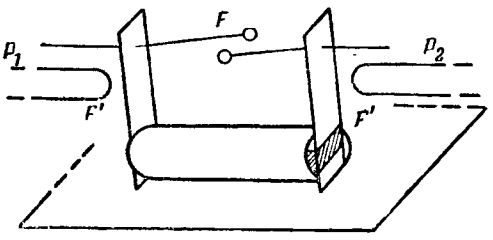


Рис. 140. Схема установки для звукового искрового разрядника (по Теплеру).

мыкании дает один разряд, если каждый раз он может зарядить емкость в 3 000 *см* до напряжения порядка 15 000 *в*.

S — защитный разрядник (может отсутствовать);

$C_1 = C_2$ — лейденские банки средней величины (емкостью около 2 000 *см*);

C_3 — лейденская банка емкостью 1 000—3 000 *см*; она должна служить для усиления первичной искры или, лучше, ее звуковой волны [1].

[1] При применении машин с очень слабыми токами мешающее увеличение емкости за счет конденсатора C_3 можно легко обойти, если C_3 подключить параллельно не к F, а к f; конечно, при этом теряют в длине скользящей искры.

В то время как внутренние обкладки лейденских банок C_1 и C_2 соединены с машиной M и защитным разрядником, провода от наружных обкладок идут к разряднику скользящей искры f. Скользящий искровой разряд протекает на обыкновенном куске мела, сильно смоченном водопроводной водой, лежащем на стеклянной пластинке; на куске мела провода от лейденских банок C_1 и C_2 ничем не укрепляются; если же хотят избавиться от перемещений скользящего искрового разряда, то, естественно, все нужно сделать прочнее, надежнее.

В качестве осветительной линзы достаточно взять простую собирательную линзу диаметром около 5 *см* с фокусным расстоянием до 30 *см*.

Если нужно работать при точной установке скользящего разряда f, то необходимо для создания разности во времени между звуковым разрядом F и осветительным разрядом f изменять первичное напряжение.

Так как менять звуковой разрядник сложно, то необходимо подключить где-нибудь к проводам, идущим к F, легко изменяющийся вспомогательный разрядник F'.

Особенно просто и легко изготовить следующую установку (рис. 140): между двумя отодвинутыми на расстояние около 6 *см* полюсами P_1 и P_2 разрядника помещается на стеклянной пластинке единственная вновь изготовляемая часть всей экспериментальной установки. Последняя устроена так: две латунных планки шириной около 1,5 *см*, толщиной 2—3 *мм* и высотой около 5 *см* плотно прикрепляются с помощью резинового шнура к куску стеклянной трубки длиной около 5 *см* и диаметром 2 *см*, который с обеих сторон гладко отрезан или отшлифован. В качестве электродов звукового искрового разрядника F служат две металлические булавки, которые прочно всажены в латунные планки. Их металлические головки должны быть по возможности круглыми и иметь диаметр около 3 *мм*; расстояние между головками булавок, т. е. длину искры, следует выбирать равной около 3 *мм*.

В качестве диафрагмы может служить лист любой толщины с несколько сглаженными прямолинейными кромками. В точке O располагается глаз или, лучше, оптическая труба или бинокль с достаточно длинной выдвижной частью.

Если уложить мел со скользящей искрой, как пока-

зано на рис. 139, то грань *bb* мела может служить в качестве экрана осветительной искры. Эта грань будет, как известно, отражена с помощью линзы *L* на экран *B*.

Экран следует установить так, чтобы грань *B* лежала параллельно изображению *bb* и чтобы светлое изображение скользящей искры полностью затемнилось. Наибольшая часть отклоненного света проходит вплотную к верхней части грани экрана. Если по возможности много света должно идти в зрительную трубу, то ее нужно установить так, чтобы почти половина ее объектива закрывалась экраном *B*.

При использовании трех лейденских банок C_1, C_2 и C_3 заданной величины звуковые волны и их освещенность уже так интенсивны, что не требуется какого-либо затемнения комнаты для их наблюдения.

Приведенная экспериментальная установка (рис. 138) дает вскоре после начала звукового искрового разряда *F* осветительный искровой разряд *f*. О количественной зависимости первичного напряжения (*P кв*), длины скользящей искры (*f см*) и радиуса звуковой волны (*r см*) следует здесь для ориентировки заметить следующее:

1. Для каждого значения первичного напряжения получают на определенном полупроводнике определенную наибольшую длину скользящей искры ($f_{макс}$ *см*)

$$f_{макс} = a(P - b).$$

В приведенной ниже таблице даны значения *a* и *b* для нескольких полупроводниковых стержней (табл. 7).

Таблица 7

Размеры разрядников скользящей искры по Теплеру

Материал	Размеры, *см* (высота, ширина, длина)	Емкость при $C_1 = C_2$	*a*	*b*
Сырой мел	1,5×1,5×10	По 1 банке (по 2 000 *см*)	0,52	5,8
		По 9 банок (по 42 000 *см*)	0,63	0,4
То же	0,65×0,70×13	По 17 банок (по 82 000 *см*)	0,65	0,0
Сырой гипсовый стержень	1,7×1,1×40	По 1 банке (по 2 000 *см*)	0,37	6,0
		По 9 банок (по 42 000 *см*)	0,51	0,5
		По 1 банке (по 2 000 *см*)	0,38	5,9
		По 9 банок (по 42 000 *см*)	0,48	0,7
		По 17 банок (по 82 000 *см*)	0,51	0,0

Здесь безразлично, была ли подключена емкость C_3 или нет.

Так как длина скользящей искры 4 *см* достаточна, то достаточно и первичное напряжение до 15 *кв*.

Если измерять не первичное напряжение P, а возникающее на полюсах P_1, P_2 напряжение P_1, то получают, что $P—P_1$ почти равно b; итак, считается, что наибольшая длина скользящего искрового разряда на полупроводящих стержнях пропорциональна напряжению, приложенному к полюсам скользящего разряда.

2. Если f характеризует действительно включенную, а $f_{макс}$ — достигаемую при P наибольшую длину скользящей искры, то из табл. 8 можно получить радиус r звуковой волны для различных соотношений длин.

Таблица 8

Радиус звуковой волны и длина скользящего искрового разряда по Теплеру

$f:f_{макс}$	0,25	0,50	0,75	1,0
Радиус r звуковой волны	0,10	0,23	0,50	—

Это одинаково относится ко всем полупроводящим стержням и к любым величинам емкостей C_1 и C_2, если емкость C_3 не подключена; усиливая звуковую волну при помощи емкости C_3, получают всегда несколько большие значения радиусов. На рис. 141 приведены в отдельности эти значения для мела, упомянутого первым; емкость C_3 здесь не была подключена.

Для получения звуковых волн обычной длины (с радиусом 1—2 *см*) нужно иметь значение f, близкое к $f_{макс}$.

Скользящий искровой разряд в инертных газах вместо воздуха исследовался Фюнфером [Л. 43]. Удалось увеличить световую отдачу в среде аргона, криптона или ксенона в 5 раз и получить к. п. д. для световой энергии приблизительно равным 20%. Световая отдача возрастает также с повышением давления при разряде.

Луи и Шаде [Л. 44] сообщают об источнике скользящих искровых разрядов, которые позволяют произво-

дить серию кратковременных вспышек света большой интенсивности. Этот источник света состоит из скользящего искрового разряда, который зажигается между двумя металлическими электродами при расстоянии между ними около 5 *см* на пористой, пропитанной электролитом керамике (подобно мелу в эксперименте Теплера по рис. 139). Путем этого скользящего разряда

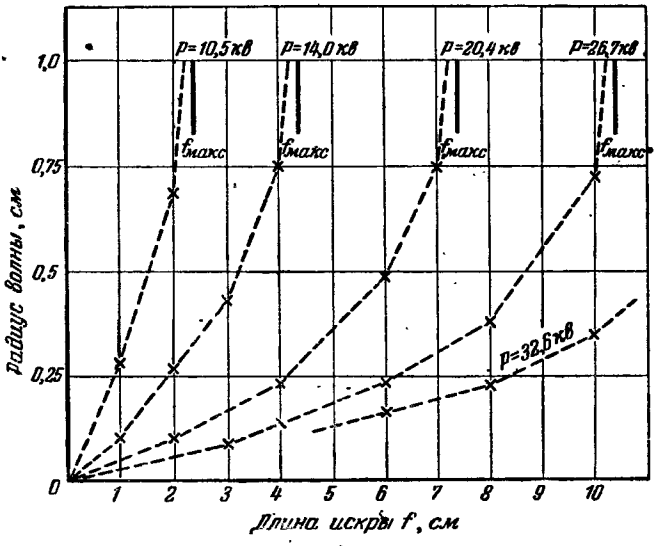


Рис. 141. Рекомендованные Теплером значения длин скользящего искрового разряда для освещения при съемке теневым методом как функция возрастающих величин радиусов звуковых волн.

можно повысить длину искрового разряда в 10—20 раз по сравнению с нормальной длиной искры в воздухе при одинаковом напряжении в обоих случаях. Вследствие этого сопротивление искры в каждой фазе разряда также становится больше, благодаря чему достигается лучшее согласование с разрядным контуром. По этой причине отдача электрической энергии почти в 10 раз выше, чем при нормальном искровом разряде в воздухе. Получают значения, составляющие по величине около 90% первоначально накопленной в конденсаторе энергии. Длительность посылаемого светового импульса составляет 1 *мксек*.

Далее пойдет речь об измерениях общего количества световой энергии и максимальной яркости световых импульсов.

Яркость при одном разряде конденсатора с энергией 20 *вт·сек* достаточна, например, чтобы выполнить на расстоянии 1 *м* еще нормальные снимки при диафрагме *4—5, 6.*

Установка для получения снимков следующая: при простом механическом устройстве серия конденсаторов разряжается через описанный выше искровой разрядник при выбранных промежутках времени между разрядами и полученные таким образом вспышки света облучают объект. Частота разрядов может быть изменена в пределах 25—10 000 искр в 1 *сек.* Съемочный аппарат с нормальной оптикой снимает исследуемый предмет на вращающуюся пленку.

При наибольшей частоте кадров время смены кадров и продолжительность вспышек находятся в соотношении 100 : 1, т. е. возникающая вследствие движения кадров нерезкость (дефокусировка) составляет не более 1/100 высоты изображения.

Методом, описанным выше, можно просто производить съемку быстропротекающих процессов, причем, конечно, количество снимков ограничено.

Интенсивность источника света, необходимая для съемок, достигалась путем специального искрового разряда, а именно путем упомянутого скользящего искрового разряда вдоль пористой керамики, которая пропитана жидкостью электролита (рис. 142).

Сравнение нормального искрового разряда в свободном газовом пространстве со скользящим искровым разрядом показывает, что при постоянной величине напряжения и достаточной величине зарядного конденсатора, служащего накопителем энергии, таким образом можно производить искровые разряды, которые по длине превосходят обычный искровой разряд в воздухе в 10—20 раз. В связи с большей длиной искры увеличивается сопротивление искры в каждой фазе разряда. Благодаря этому получают значительно лучшее согласование с разрядным контуром и тем самым лучшую электрическую и оптическую отдачу. Эффективная продолжительность вспышки, благодаря этим мерам, конечно, повышается. Она составляет около 1 *мксек.*

Применение скользящих искровых разрядов для таких задач не является новым [Л. 43]. Для их получения использовались полупроводники, а также изоляторы. Однако у первых был тот недостаток, что полупроводящий материал не может долго выдерживать нагрузку тока на контактах.

У изоляторов, наоборот, необходимы для получения разряда сравнительно большие напряжения в нача-

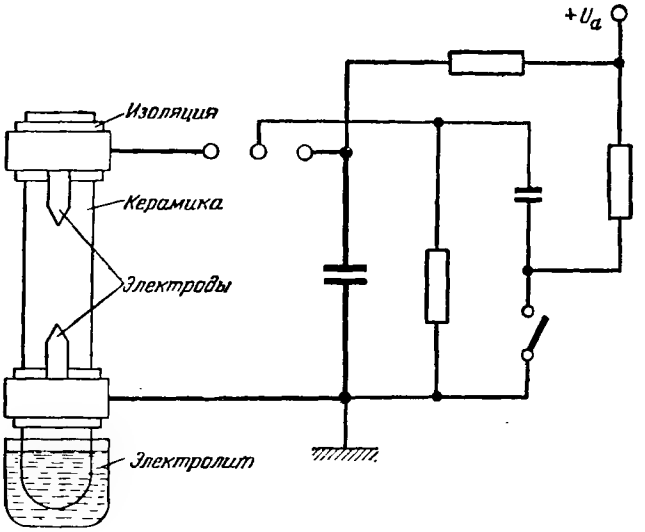


Рис. 142. Установка для получения скользящих искровых разрядов с пористой керамикой, пропитанной электролитом.

ле разряда. Оба недостатка не встречаются у искрового разрядника, применявшегося Луи и Шаде. При применении керамики [1], пропитанной электролитом, достигается, кроме того то, что искровой разрядник при последующей диффузии жидкости сам восстанавливается.

Далее, при изменении концентрации электролита можно изменять в широких пределах значение сопротивления искрового разрядника, т. е. то сопротивление, которое в значительной мере определяет начальный ток и тем самым начало зажигания. От значения этого со-

[1] Как и у описанного выше сырого мела по Теплеру.

противления зависит задержка вспышки отдельных разрядов. В нашем случае это имеет значение постольку, поскольку время задержки должно быть коротким, что может быть достигнуто при малом значении сопротивления участка керамики. На рис. 142 показаны описанный искровой разрядник и его принципиальная схема. Слева показана керамика с электродами и электролитом, рядом — вспомогательный разрядник и относящийся к нему заряженный конденсатор. Для начала разряда конденсатор с помощью вспомогательного разрядника подключается к основному искровому разряднику. Через некоторое постоянное время задержки происходит искровой разряд и присоединенный конденсатор разряжается.

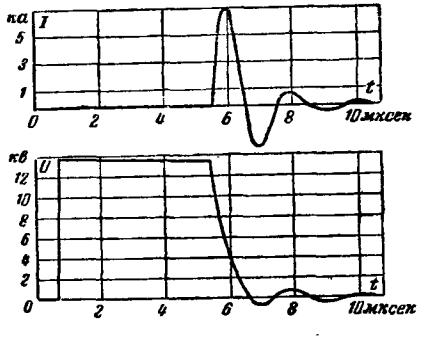


Рис. 143. Напряжение и ток в скользящем искровом разряде, полученном на установке по рис. 142.

Падение напряжения на применявшемся нами искровом разряднике, как и разрядный ток в цепи искрового разряда как функция времени, были исследованы осциллографом. Результаты показаны на рис. 143 и 144. По оси абсцисс отложено время в микросекундах; по оси ординат: вверху — ток в килоамперах, а внизу — напряжение в киловольтах. Момент зажигания, время задержки и провал напряжения ясно видны на графиках. Максимальный ток составляет 7 *ка*, приложенное напряжение 13 *кв*. Разряд протекает, даже при короткой проводке, все еще с колебаниями, но все же сильно демпфированный. Напряжение не следует за колебаниями тока в той же мере, так как сопротивление искрового разряда очень быстро снижается до очень малых значений, менее 1 *ом*.

На рис. 144 представлена полученная из кривых тока и напряжения электрическая мощность в искре как функция времени. По оси ординат отложена мощность в мегаваттах. Площадь ниже кривой является мерой использованной в искровом разряде энергии.

При рассмотрении диаграммы можно установить, что более 90% энергии, накопленной в конденсаторе, расходуется в самом искровом разряде, а не в проводах. Значения для нормального искрового разряда в воздухе составляют 7—10%. Продолжительность светового излучения отдельного разряда была измерена фотоэлектронным умножителем и широкополосным усилителем. Результаты измерений представлены на рис. 145. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — интенсивность света в «фотографических свечах».

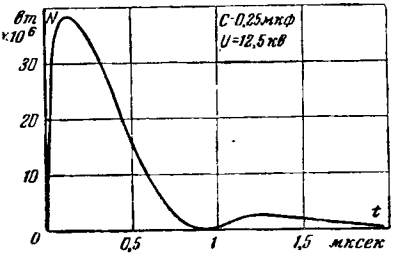


Рис. 144. Мощность скользящего искрового разряда как функция времени.

Для половины ширины диаграммы светового импульса значение времени 0,9 *мксек*.

Максимальная яркость получена $5{,}5 \cdot 10^6$ «фотографических свечей». Как было определено, это значение может быть объяснено следующим образом. Путем сравнения с вольфрамовой ленточной лампой определенной яркости по почернению пленки вычисляется фотографически эффективное количество света одной искры. Получается значение 5—10 фотографических «свече-секунд» в зависимости от рода пленки и проявителя. Эта величина охватывает уже сверхкратковременный эффект, т. е. снижение чувстви-

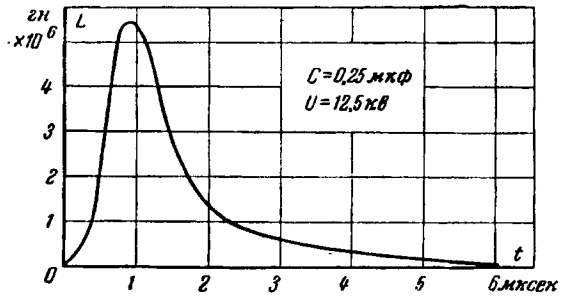


Рис. 145. Световое излучение скользящего искрового разряда по рис. 143.

тельности пленки вследствие кратковременности освещения. Если взять за основу среднюю величину, равную 7,5 «фотографической свече-секунды», и принять, что представленный ход кривых справедлив для широкого диапазона световых волн, то для максимальной яркости будет получена приведенная выше величина. Физическая абсолютная величина силы света, основанная на чувствительности глаза, должна быть умножена на коэффициент 2—3.

В последнем значении мало смысла, так как здесь идет речь только о чувствительности пленки к такого рода импульсам. Как было установлено, яркость искрового разряда достаточна, чтобы на расстоянии 1 *м* получать еще нормальные снимки с диафрагмой 4—5,6.

Если применять искровой разрядник периодически, то установлено, что максимальная яркость полученных импульсов с сокращением интервалов времени между разрядами медленно падает.

Остаточная ионизация от предыдущей искры снижает сопротивление искрового разряда при последующем разряде и излучение световой энергии. При серии искровых разрядов с промежутками между разрядами, равными 10^{-4} *сек*, т. е. 10 000 искр в 1 *сек*, вызванные вследствие этого потери в яркости уже заметны. Чтобы воспрепятствовать этому, вместно одного искрового разрядника применяются двойной искровой разрядник, обе части которого работают попеременно. При промежутках времени между разрядами $1 \cdot 10^{-4}$ *сек* к каждому из обоих разрядников ток подводится снова только через $2 \cdot 10^{-4}$ *сек*. Благодаря этой мере даже в случае максимальной нагрузки, максимальная яркость снижается не более чем на 50% своей максимальной величины.

Каждый отдельный разряд происходит при энергии 20 *вт · сек*, величине конденсатора 0,25 *мкф*, напряжении 12—14 *кв*. Для непрерывного получения искровых разрядов при 10 000 искр в 1 *сек* требовалась бы соответственно мощность 200 *квт*. Так как эта мощность не может быть получена стационарно без больших затрат, нужно обратиться вновь к принципу накопления энергии в конденсаторах. Вследствие этого ограничивается число снимков (кадров), так как из условий размещения и вследствие необходимости иметь по возможности корот-

кие провода нежелательно подключать много конденсаторов к искровому разряднику. Здесь применяется 15 конденсаторов, так что каждая серия снимков состоит из 15 снимков. Аумонт и Водар [Л. 45] попытались повлиять на скользящий искровой разряд с помощью высоких давлений.

Оптические и электрические характеристики разряда в газах при большом давлении мало изучены, хотя и имеются некоторые важные работы в этой области. С практической точки зрения повышение давления дает увеличение яркости и при определенных условиях усиление непрерывного спектра. Поэтому было предпринято систематическое изучение искровых разрядов в различных газах, причем давления выбирались от 10 до 1 000 *ат*. В настоящее время предварительные результаты получены для давлений до 150 *ат*.

При проведении работ со скользящим искровым разрядом можно было получать разряды в газе, которые не были бы загрязнены парами материала электродов даже при большом давлении, причем у нормальных искровых разрядников в этом случае расстояние между электродами было очень мало. Были исследованы некоторые виды скользящих искровых разрядов в различных газах: H_2, N_2, He и Ar.

Производился спектральный анализ видимой и ультрафиолетовой частей спектра разрядов до 2 000 Å.

Исследованные спектры характеризуются следующим:

1. При сильных разрядах спектры все более похожи и характеризуются значительным расширением линий и усилением непрерывного фона, который быстро возрастает с повышением давления, чтобы, наконец, перейти в почти непрерывный спектр.

2. При слабых разрядах наблюдают только слабый непрерывный спектр и линейчатый спектр газа; расширение линий незначительно.

Общая сила света определялась фотоэлектрическим путем. Для этой цели использовался умножитель, соединенный с усилителем с большой полосой пропускания и двухлучевым осциллографом. Последний позволяет производить также одновременную запись тока разряда. Были получены кривые яркости в зависимости от давления при постоянных электрических величинах.

Скользящий искровой разряд по сроку службы менее продолжителен, чем обычно применяемые лампы с капиллярным или искровым разрядом в искрогасительной камере; это объясняется тем, что искра своей крайне высокой температурой проплавляет или прожигает пути в изоляционной подкладке. Даже у установки Луи и Шаде, которая вследствие пропитки жидким электролитом имеет сравнительно большой срок службы, количество разрядов ограничено.

Область применения скользящих искровых разрядов в общих чертах следующая:

1. Основное условие — количество разрядов у таких искровых разрядников должно быть ограниченным (может быть 10^1—10^3).

2. Источник света удлиненной формы является пригодным, например, для освещения простыми параболическими зеркалами, у которых на фокусной линии устанавливается скользящий искровой разряд. Линзы, параболоиды вращения или эллиптические зеркала могут быть использованы только с небольшим к. п. д., так как используется только небольшой, в виде точки, участок длинного искрового разряда.

3. Главное преимущество таких разрядов заключается в том, что они могут иметь почти неограниченную величину и могут быть приспособлены для применения очень сильных разрядов конденсатора для освещения больших объектов.

2. КАПИЛЛЯРНЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯД

Получение вспышек с помощью капиллярного искрового разряда является одним из немногих известных каждому технических применений искрового разряда. После того как 10 лет назад на рынке появились первые аппараты для фотовспышек, выпущенные для фотолюбителей и профессиональных фотографов, все время происходит дальнейшее усовершенствование их с целью упрощения конструкции и повышения мощности.

При капиллярном разряде инертный газ, находящийся в трубке из тугоплавкого стекла в качестве среды (большей частью ксенон), при разряде, вызванном импульсом зажигания, не может свободно расширяться — он ограничен стенками трубки. При разряде только находящиеся в трубке атомы могут ионизироваться и уве-

личивать проводимость; их температура вследствие излучения и конвекции поддерживается столь низкой, что многократная ионизация практически исключена. Возможность перемещения электричества ограничена, разряд стабилизированный стенками, протекает медленно, при ограниченной величине тока. Ток возрастает при возрастании приложенного напряжения подобно закону Ома также при увеличении диаметра трубки и повышении давления газа, заполняющего трубку.

Наиболее мощные разряды превращают в световую энергию при применении спиральной трубки длиной около 1 *м*, диаметром 10 *мм* при напряжении 2 500 *в* и энергии конденсатора 10 000 *дж* (специальная лампа PTW, Висбаден). Коэффициент полезного действия при превращении в световую энергию в видимой области составляет 10—15%, длительность вспышки составляет около 0,01 *сек*, энергия зажигания, необходимая для начала разряда, 40 *мвт·сек*. С помощью мощного светового потока таких импульсных ламп стало возможным при изготовлении типографских клише вместо длительного освещения обычными дуговыми лампами добиваться таких же результатов за несколько секунд при применении нескольких или даже одной вспышки.

Обычные имеющиеся в продаже аппараты для фотовспышки работают в настоящее время с применением небольшого аппарата на транзисторах. В этом случае получение высокого напряжения автоматически прерывается (выключается транзистор), так что сохраняется энергия питающей сухой батареи. Величина заряжаемых конденсаторов зависит от типа установки. Самые маленькие лампы-вспышки изготовляются для энергии разряда 20 *дж* при 300 *в*, большего размера лампы: на 80 *дж* — 500 *в*, на 300 *дж* — 500 *в*. Они всегда наполнены ксеноном. Катоды таких ламп-вспышек подвергают специальной обработке, чтобы обеспечить надежное зажигание при малых рабочих напряжениях в пределах величин напряжений, которые могут быть получены обычно от электролитических конденсаторов (300—550 *в*). Только электролитические конденсаторы достаточно дешевы, обеспечивая получение большого количества энергии и занимая мало места. Они нашли в этом случае соответствующее применение, так как только небольшое количество вспышек, может быть, несколько

десятков или сотен тысяч, производится фотолюбителем за время службы одного аппарата для фотовспышек.

В области миллисекунд Ляпорту удалось создать лампу-вспышку для энергии разряда 40 000 *дж*. С помощью света этой лампы ему удалось сфотографировать дворец Шалье с Эйфелевой башни на расстоянии

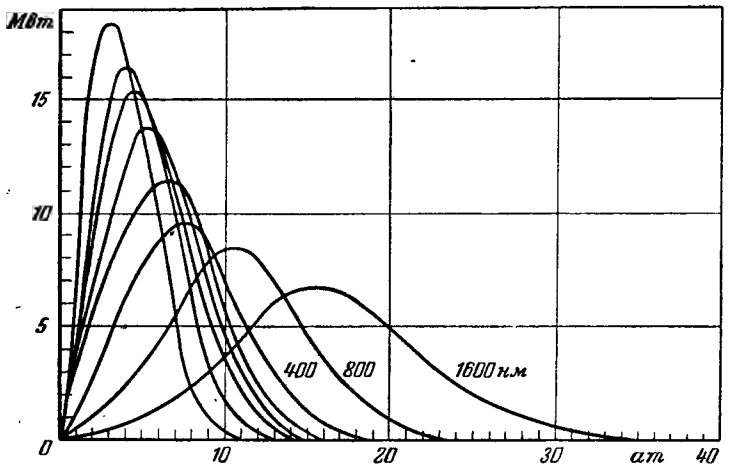


Рис. 146. Мощность N-разрядного импульса при различных давлениях газа.

700 *м*. Такие лампы имеют большое значение для получения серий снимков при полете, так как, например, при высоте полета 1 *км* и перемещении от снятой полосы местности к неснятой должен автоматически включаться следующий кадр и одновременно с ним — вспышка. Электроды этих ламп большой мощности изготовлены из сплава ковара, разряд происходит в кварцевом капилляре. Честерман и Глег [Л. 46] разработали лампы в капиллярном исполнении с ксеноновым наполнением для вспышек продолжительностью в микросекунды. При пиках тока от 500 до 2 500 *а* они получали при 7,2 *дж* максимальную мощность около 20 *Мвт*. Разряды включаются здесь нормально с помощью последовательно включенных водородных тиратронов; тем самым обеспечиваются последовательность включений лампы, возникновение и затухание света в зависимости от давления

(см. на рис. 146—148). С возрастанием давления газа разряд становится более медленным. Влияние индуктивности проводов практически было сокращено до 0 путем непосредственного соединения с конденсатором. В практической эксплуатации при применении водородного тиратрона в качестве средства включения это не-

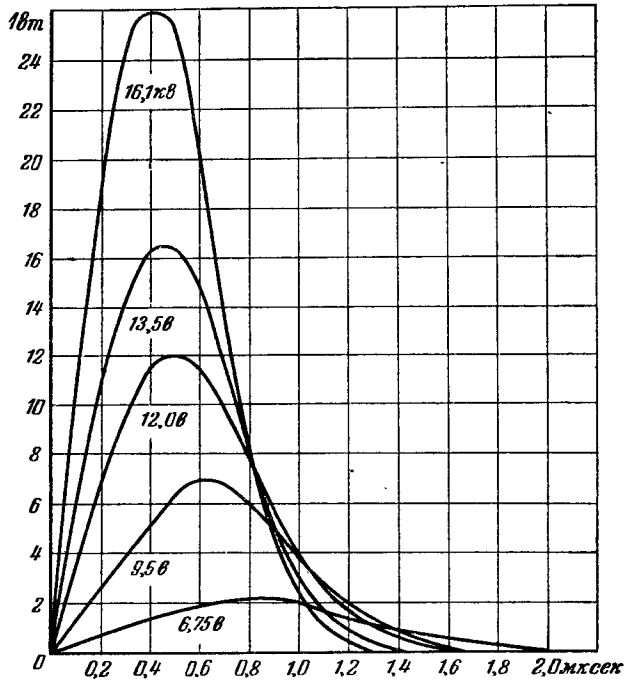


Рис. 147. Изменение мощности N во время разряда; продолжительность вспышки в зависимости от напряжения (*кв*) и мощности (*Мвт*).

возможно, так как геометрическая индуктивность проводов удлиняет вспышку.

Масса стенок капиллярной лампы определяет ее теплоемкость и в соответствии с этим количество джоулей, которое требуется для отдельной вспышки или короткой серии вспышек.

До 8 000 вспышек в 1 *сек* при 1 *дж* на вспышку и продолжительности работы 0,1 *сек* удалось для микро-

Тип лампы	FX-1	FX-2	FX-3
Рекомендуемый вид работы	Отдельная вспышка	Стробоскопия с	
Допустимая энергия, емкость и напряжение	200 *вт·сек*, 100 *мкф* при 2 000 *в*	1,25 *вт·сек*, 0,04 *мкф* при 8 000 *в*	1,25 *вт·сек*, 0,04 *мкф* при 8 000 *в*
Излучение света, измерение в горизонтальном направлении, *св.сек*	1 000	0,6	0,84
Срок службы при допустимой энергии (количество вспышек), *ч*	20 000	10^5 до 10^6	10^5 до 10^6
Длительность вспышки, *мксек*	150	2	2
Частота вспышек или средняя мощность, *вт*	1 за 5 *сек* 40 *вт*	800	800
Рабочие характеристики			
Минимальное напряжение на электродах	700	—	—
Пробивное напряжение	3 500	—	—
Собственное сопротивление разряда, *ом*	2	50	50
Физические данные			
Материал стенки лампы	Викор	Кварцевая спираль	Кварц
Давление наполнения в торрах	200	45 ксенон 15 H_2	45 ксенон 15 H_2

секундных вспышек синхронизировать с высокочастотными камерами и для небольших длин пленок получить при чрезвычайно коротком по продолжительности освещении высококачественные снимки вместо непрерывного освещения при применении оптически компенсирующих вращающихся призм.

Наиболее пригодные рабочие напряжения для получения разрядов показаны на рис. 147 в области напряжений 10—16 *кв*, так как возрастание напряжения практически не удлиняет вспышку. Излучение в инфракрасной части спектра (1 600 *ммк*) протекает гораздо более медленно, чем коротковолновое излучение в ультрафио-

Таблица 9

службы газоразрядных ламп

FX-4	FX-5	FX-11	FX-11A	FX-12
серией вспышек		Отдельная вспышка	—	Стробоскопия
0,125 *вт·сек*, 1 *мкф* при 500 *в*	200 *вт·сек*, 100 *мкф* при 2 000 *в*	1 *вт·сек*, 2 *мкф* при 1 000 *в*	1 *вт·сек*, 2 *мкф* при 1 000 *в*	1 *вт·сек*, 0,5 *мкф* при 2 000 *в*
0,02	1 000	1	1	2
4 000	20 000	200 000	200 000	6 000
6	150	3	3	1
10	1 за 5 *сек* 40 *вт*	1 (1 *вт*)	1 (1 *вт*)	6 000 (600 *вт*)
250	800	600	400	400
1 000	3 500	3 000	3 000	4 000
1	2	0,1	0,1	0,5
Тугоплавкое стекло пирекс	Викор	Викор	Викор	Викор
100	150	1 520	1 520	760

летовой части, которое дает наиболее короткие и интенсивные вспышки.

В табл. 9 показан ряд разрядных ламп одной из фирм США как пример достижимых в серийном производстве мощностей и сроков службы.

Область применения капиллярных разрядов может быть охарактеризована следующим образом.

Особые преимущества.

Большая энергия разряда.

Можно легко изменять длительность вспышки в пределах 10 *мсек* — 1 *мксек* посредством наполнения газом или изменения емкости или напряжения.

Малые затраты на изготовление.

Большой срок службы.
Большая световая отдача.

Недостатки.

Большие размеры светящегося тела, сравнительно с искрой небольшая яркость, поэтому не может применяться как точечный источник, небольшая теплоемкость, поэтому ограничена общая энергия серии вспышек.

Заранее заданная индуктивность самой лампы удлиненной или спиральной формы, поэтому она неприменима для очень коротких вспышек.

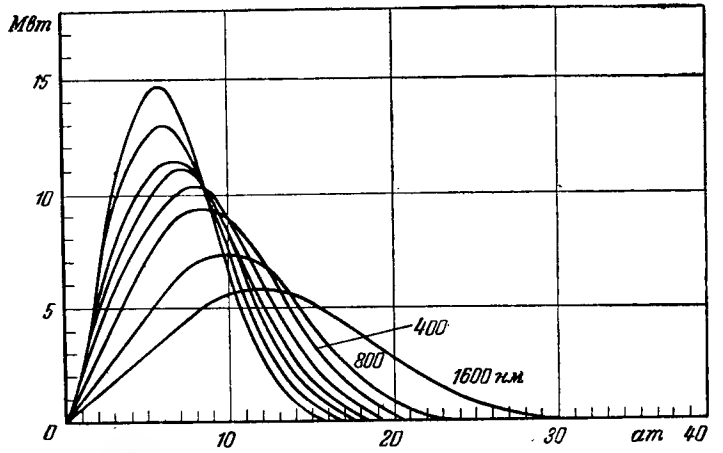


Рис. 148. Пики эмиссии (*Мвт*) в зависимости от давления газа для коаксиальных кабелей различной длины.

3. СВОБОДНЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯД В АТМОСФЕРЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Фрюнгель [Л. 54] в 1943 г. исследовал спектры и длительность искровых разрядов и разработал оптимальные данные для наибольших яркостей и наименьшей длительности искровых разрядов; он также указал методику расчета объема искры. Работы были продолжены Глазером [Л. 56], который определил для аргона, ксенона, криптона, водорода, азота, окиси углерода и ртути в искровых камерах и лампах к. п. д. при получении света, продолжительность вспышек и диаметр искры. Здесь приводятся таблицы Глазера, так как они представляют наиболее полный материал об искровых камерах, который когда-либо был собран до этого.

На рис. 149 показана принципиальная измерительная схема. Могут меняться L, C, U; нагрузочное сопротивле-

ние R или ограничительные дроссели L_1 оказывают влияние на самоопрокидывание измеряемой импульсной лампы в желаемом темпе.

В табл. 10 приведены результаты работ Глазера при изменении газа для наполнения ламп и индуктивности. Соотношения для газов криптона, ксенона, азота, углекислого и паров ртути такие же, как и для аргона. По-

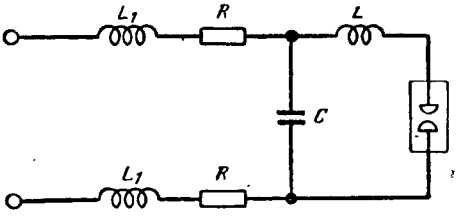


Рис. 149. Принципиальная схема контура для измерения излучения и яркости искр при высоком давлении в зависимости от L и U.

этому приведены краткие данные. У водорода же имеется отклонение в поведении.

Ниже приведены замечания относительно поведения наполняющих газов в искровых камерах.

а) **Криптон.** Особенно много линий криптона находится между 320 и 450 *ммк*, что заметно также и при кратковременных разрядах. Так как стоимость криптона еще позволяет использовать его для лабораторных работ с наполнением искровых камер с изменяющимся давлением, а как тяжелый газ он очень пригоден для получения разрядов с большой яркостью, то этот газ был особенно тщательно изучен Глазером, как показывают диаграммы на рис. 150. На шести снятых спектральных кривых измерено спектральное излучение волн различной длины при различных параметрах напряжения, емкости и индуктивности. Как и ожидалось, в подтверждение измерений Фрюнгеля при коротковолновом ультрафиолетовом излучении (кривая *1*) при малой емкости (0,1 *мкф*) без включения индуктивности линии наибольшее излучение обнаружено около $\frac{5 \cdot 10^{-9} вт \cdot сек}{10^{-4} ммк}$, однако выход инфракрасных лучей искрового разряда также значителен (кривая *2*).

Таблица 10

Оптическая отдача для различных газов при различных параметрах разряда в искровых разрядниках с высоким давлением (по Глазеру)

Вид газа	Давление газа P, *ат*	Расстояние между d, *мм*	Pd, *ат·мм*	Напряжение U, *кв*	Емкость C, *мкф*	$1/2\ CU^2$, *вт·сек*	L, *мкгн* $L=L_i/L_a$	Отдача $\eta = \frac{M_{\lambda_1}^{\lambda_2}}{1/2\ CU^2}$ %					
								250—300	300—380	380—520	520—760	760—900	Σ
Ar	11	5,6	62	10	0,1	5	0,1	1,26	1,44	1,99	1,80	1,79	8,28
Ar	11	9,5	105	14	0,1	10	0,1	1,54	1,72	2,22	2,05	0,35	8,48
Ar	11	2,72	29	6	0,1	1,8	0,1	0,88	1,23	1,64	1,59	0,71	6,05
Ar	11	2,3	25	10	0,1	5	0,1	0,98	1,21	1,31	1,07	0,51	5,09
Ar	7,2	3,6	26	10	0,1	5	0,1	0,73	1,18	1,40	1,18	0,60	5,08
Ar	4,0	6,5	26	10	0,1	5	0,1	0,61	1,09	1,61	1,82	0,93	6,06
Ar	1,5	14	21	10	0,1	5	0,1	0,50	1,22	1,85	2,06	1,10	6,73
Ar	10,7	5,8	62	10	0,1	5	2,97	0,50	0,92	1,40	1,53	0,85	5,20
Ar	10,7	5,8	62	10	0,1	5	27,9	0,32	0,52	0,91	1,21	0,81	3,77
Ar	10,7	5,8	62	10	0,1	5	263	0,23	0,29	0,53	0,93	0,82	2,80
Xe	13	6	78	10	0,1	5	0,1	2,28	2,06	2,50	2,77	0,56	10,17
Kr	14	3,2	45	10	0,2	10	0,1	2,08	1,58	1,95	1,81	0,70	8,12
H_2	10,3	10	10,3	10	0,1	5	0,1	0,014	0,019	0,048			0,081
	10,3	10	10,3	10	0,1	5	10	0,021	0,034	0,105			0,160
	11	0,75		8,4	5	5	62,5	100	0,185	0,075	0,104	0,101 0,021	0,486
N_2	11,6	2,2		26	10	0,1	5	0,1	0,68	0,65	0,61		1,94
N_2	11,6	3,1		36	14	0,1	10	0,1	1,02	0,92	0,99		2,93
CO_2	9,8	1,2		11,8	10	0,1	5	0,1	0,36	0,42	0,50		1,28
	11	1,8		20	14	0,65	6,5	0,1	0,40	0,32	0,35	0,35 0,12	1,54
Hg	8	5		40	10	0,2	10	0,1	0,20	1,07	1,08	1,08 0,16	3,59

в) Ксенон. Измерения проводились с техническими кварцевыми лампами НВО 321 и НВО 1021. Интенсивность излучения подобна излучениям аргона и криптона. Интенсивные ксеноновые линии лежат в пределах 380—440 *ммк*. Интересно сравнение с режимом дуги постоянного тока в атмосфере высокого давления ксенона. Хо-

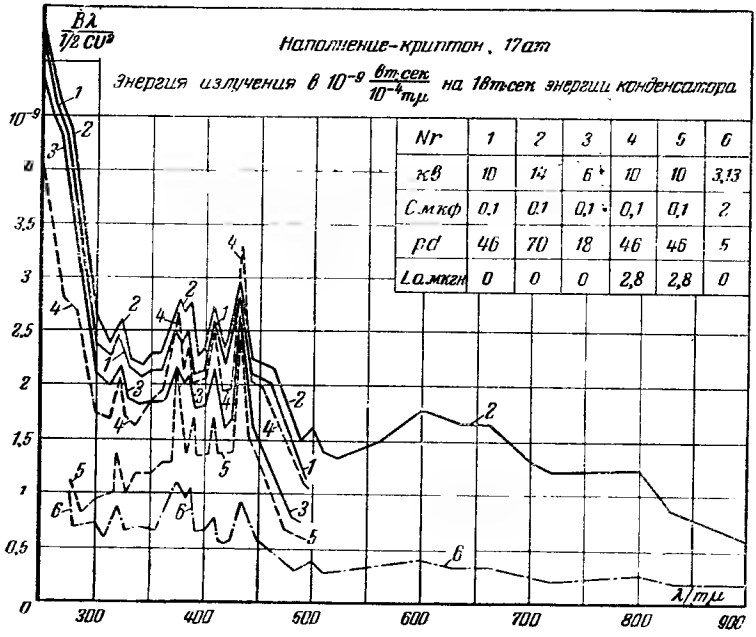


Рис. 150. Спектральное излучение импульсной лампы с высоким давлением при различных индуктивностях и расстояниях между электродами (по Глазеру).

тя при этом стационарном режиме, особенно в видимой части, ярко выражена непрерывность, однако в области ультрафиолетового излучения она слабее, чем при разряде конденсатора. Общая отдача при получении вспышек более благоприятна.

с) Азот. У многоатомных газов или газовых молекул наступает потеря энергии вследствие диссоциации. Кроме того, искровое сопротивление значительно ниже, чем для инертных газов, и тем самым световая отдача меньше. Это выражено кривой Пашена, у которой произве-

дение *pd* в 3 раза меньше, чем у аргона. Из спектрального снимка видно, что ионизированные четырежды линии азота 3477 А и 3482 А выявляются только при наиболее коротком разряде. Это дает указание о температуре электронов. Группы линий 330 *ммк* и 400 *ммк* проявляются особенно четко.

d) **Смесь азота с аргоном.** Технически чистый аргон содержит около 2% N_2. Заметное снижение отдачи по сравнению с чистым аргоном наступает только при содержании 10% азота.

e) **Углекислый газ.** *pd* в 6 раз меньше, чем у аргона. Вследствие малого искрового сопротивления получаются небольшие значения отдачи. Так же как и азот, углекислый газ дает много групп линий даже при высоком давлении и коротком разряде, особенно около 400 *ммк*. Более подробные данные и кривые могут быть взяты из [Л. 56].

Кислород неблагоприятно действует на распыление электрода.

f) **Пары ртути.** В парах металла, давление которых может быть повышено при возрастании температуры, можно получить искровые разряды. Измерения производились с техническими кварцевыми лампами НВО 2001 и НВО 500. Давление паров создавалось путем нагрева снаружи. В соответствии с кривой давлений оно является известной функцией температуры. При температуре около 500° С ртуть испаряется полностью так, что при более высоких температурах давление возрастает мало. Соответствующие значения *pd* кривой Пашена составляют $^2/_3$ значений для аргона.

При получении вспышек от лампы НВО 2001 получается тем большее расширение линий и тем более широкий спектр поглощения ($>2\,537$ Å), чем выше давление и напряжение и чем меньше самоиндукция. Здесь — по сравнению с работой на постоянном токе — получается более сильный непрерывный спектр, который вообще срезается полосами поглощения и $<2\,340$ Å. Как и у азота и углекислого газа, линейный спектр, несмотря на кратковременность разряда, выражен сравнительно сильно.

g) **Водород.** Водород по сравнению с инертными газами имеет высокую энергию диссоциации и особенно ма-

лое сопротивление искрового разряда. Так, соответствующее значение *pd* кривой Пашена примерно в 6 раз меньше, чем у аргона. Это понятно, так как напряжение зажигания наполняющего газа при одинаковом *pd* тем меньше, чем меньше сродство к электрону и чем больше масса положительных ионов.

При легко возбуждаемых атомах водорода линии Бальмера $H_{\alpha, \beta, \gamma}$ тем шире, а непрерывный спектр тем интенсивнее, чем больше давление и напряжение.

В противоположность другим газам по всей спектральной области при увеличении продолжительности разряда повышается световая отдача. При уменьшении тока в искре возрастает малое сопротивление искрового разряда и благодаря этому увеличивается превращение энергии.

Световая отдача водорода вследствие малого сопротивления искры по сравнению с аргоном меньше на один порядок даже при самом благоприятном выборе индуктивности. Разницу в световом излучении у отдельных газов можно удовлетворительно объяснить различными величинами сопротивления искры и ее продолжительности.

Как наиболее подходящие газы для получения большого количества излучения, особенно в ультрафиолетовой части спектра, зарекомендовали себя, также и вследствие своей химической неактивности, инертные газы. Среди них аргон особенно дешев. Тем более, что для многих случаев может применяться аргон технической чистоты, причем технический аргон гораздо менее склонен к образованию скользящих искровых разрядов на стенках сосуда, где производится разряд, чем чистый газ.

4. ТЕХНИКА ИСКРОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР

Электрический искровой разряд применяется главным образом как скользящий или капиллярный разряд для освещения быстрых процессов в движении. Но оба вида разряда мало пригодны для освещения оптических систем. Задача состоит здесь в том, чтобы сконцентрировать свет в одной точке или пучке параллельных лучей, т. е. при малых объектах или больших, значительно удаленных, а также при работах с более слабыми искровыми разрядами с очень большой частотой искр, до 50 000 искр в 1 *сек*, а также для большей резкости в глу-

бину с малой диафрагмой, где предмету необходимо сообщить возможно большее освещение; наконец, при электронной сигнализации вспышками света. Описанная ниже искрогасительная камера (по Фрюнгелю) предназначена для получения чрезвычайно коротких вспышек с возможно более приближающимися к форме точки искровыми разрядами и чрезвычайно точным направлением света; применение принципа разрядника Маркса или искрогасящего разрядника дает дополнительно возможность получать очень большие серии разрядов.

К подобному источнику искрового света предъявляются различные требования:

Электрический разрядный контур с наиболее быстрым превращением энергии в искре и достаточной величиной искры, очень кратковременной вспышкой с наибольшей яркостью.

Система регулирования с электродом зажигания и элементами схемы для точной установки длительности до 10^{-7} *сек*.

Металл электрода с малым распылением. Конструктивное исполнение с оптически высоким к. п. д., т. е. большим используемым пространственным углом излучения. Малые эксплуатационные расходы. Вышедшие из строя лампы (расплавленные и невосстанавливаемые) удаляют.

Все параметры можно получить из только что описанных работ Глазера.

Эти требования выполняются, как видно из табл. 11.

Для наиболее быстрого превращения электрической энергии в свет искры разрядный контур должен работать по возможности в апериодическом режиме [1].

При слабо светящихся искровых разрядах с малой энергией (1/100 *вт·сек*), например при сигнализации

---

[1] Сопротивление искры изменяется во время разряда; для расчетов можно упрощенно принимать среднее значение при протекании половины разряда конденсатора. Для практики можно использовать с достаточной согласованностью с точной работой Вайцеля старую формулу Теплера:

$$R_F = \frac{K\,l}{Q},$$

где K — константа, зависящая от газа, при аргоне равная примерно $0{,}8 \cdot 10^{-3}$;
l — приведенная длина искры, *см*;
Q — протекавший разряд, т. е. *CU*, *а·сек*.

Таблица 11

Параметр	Отдельные вспышки	50 *гц*	100 *гц*	200 *гц*
Емкость, *мкф*	0,2	0,2	0,08 *мкф*	0,04 *мкф*
Зарядное напряжение, *кв*	8,0	5,5	5,0	5,0
Энергия/вспышку=1/2 CU^2, *вт·сек*	6,4	3,0	1,0	0,5
L-разрядный контур, *мкгн*	0,1	0,1	0,12	0,15
$I_{макс} = \sqrt{\frac{CU^2}{L}}$, *а*	$1{,}1 \cdot 10^4$	$7{,}5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$2{,}6 \cdot 10^3$
$N_{макс} \approx L_{макс}$ $U_{макс} \cdot 0{,}5$, *вт*	$4{,}4 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$6{,}5 \cdot 10^6$
t'* (средняя прямоугольная длительность вспышки) $= \frac{A}{N}$, *сек*	$\sim 0{,}15 \cdot 10^{-6}$	$\sim 0{,}15 \cdot 10^{-6}$	$\sim 0{,}1 \cdot 10^{-6}$	$\sim 0{,}075 \cdot 10^{-6}$
Средний световой к. п. д. импульсной лампы визуально 25 *лм/вт*; тогда максимальный световой поток, *лм*	$\sim 10^9$	$\sim 0{,}5 \cdot 10^9$	$\sim 0{,}25 \cdot 10^9$	$\sim 0{,}15 \cdot 10^9$
Количество света на лампе, *лм·сек*	~150	~75	~25	~11
Яркость света максимальная со степенью отражения рефлектора и затемнения, умноженная на 0,3: (в луче на вспышку), *лм·сек*	~45	~20	~7	~3
Наибольшая сила света в направлении излучения, измеренная на расстоянии 2 *м*, *св*	10^{10}	$7 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$
Длительность вспышки от зажигания до ослабления, на 1/*е* *мксек*	0,6	0,6	0,4	0,3

* Синусоидообразный ход вспышки пересчитан на плоский прямоугольник, высота которого равна максимальной мощности; t — ширина этого прямоугольника; действительную длительность импульса см. в последней строке таблицы.

для уличного движения, при автомобильных приборах обгонной сигнализации, можно просто достичь апериодического предела с помощью легко реализуемых индуктивностей порядка 0,2 *мкгн* в разрядном контуре. При сильно светящихся искрах индуктивность должна быть чрезвычайно малой, для того чтобы избежать растягивания разряда. Можно хорошо реализовать конструктивно

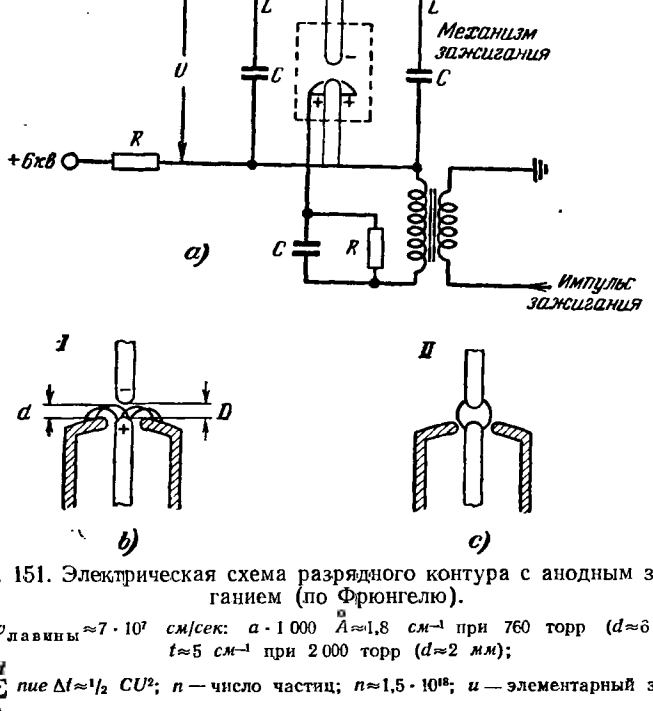


Рис. 151. Электрическая схема разрядного контура с анодным зажиганием (по Фрюнгелю).

$I - v_{\text{лавины}} \approx 7 \cdot 10^7$ *см/сек*: $a \cdot 1\,000$ $\mathring{A} \approx 1{,}8$ *см*$^{-1}$ при 760 торр ($d \approx 6$ *мм*); $t \approx 5$ *см*$^{-1}$ при 2 000 торр ($d \approx 2$ *мм*);

$II - \sum_0^t n u e \, \Delta t \approx {}^1\!/_2 \, CU^2$; n — число частиц; $n \approx 1{,}5 \cdot 10^{18}$; u — элементарный заряд; $u \approx 1{,}59 \cdot 10^{-19}$ *а · сек*; Δt — время излучения; $\Delta t \approx 3 \cdot 10^{-7}$ *сек*; работа ионизации — около 24 *вт · сек*; диаметр искры 3 *мм*; объем искры 14 *мм*^{3} (при 760 торр — около $1{,}5 \cdot 10^{18}$ частиц).

значение общей индуктивности 0,03 *мкгн* при надежном выполнении искрогасительной камеры, но трудно уменьшить это значение. Оно положено в основу расчета искрогасительной камеры (рис. 152).

Необходимую для получения искры энергию разряда можно вычислить приблизительно в соответствии с рис. 151.

Для оптического освещения параболической или эллиптической зеркальной системой при учете технического рассеивания требуется оптически светящийся, по возможности шарообразный объем искры 10—15 *мм*^{3}. Для того чтобы поддерживать $(1{,}5 \div 3) \cdot 10^{-7}$ *сек* этот объем в состоянии наибольшего светового излучения, необходима энергия для искрогасительной камеры по рис. 152 12—24 *вт · сек*.

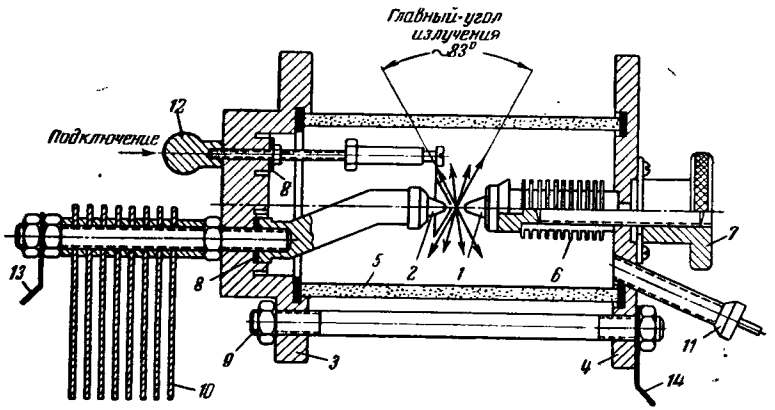


Рис. 152. Разборная установка для получения разрядов (по Фрюнгелю).

1 — заменимый главный электрод; *2* — заменимый электрод зажигания; *3* — керамическая подкладка; *4* — металлическая крышка; *5* — стеклянный или кварцевый цилиндр; *6* — пружина; *7* — винт для установки электрода; *8* — уплотнительное кольцо; *9* — зажимное устройство; *10* — охлаждающее устройство; *11* — вентиль для наполнения газом; *12* — подключение электрода зажигания, +12 *кв*; *13* — подключение главного электрода, +6 *кв*; *14* — земля.

При атмосфере высокого давления в разрядных контурах с малой индуктивностью часто получают искру шарообразной формы. Узкий первоначально искровой канал, очевидно, не имеет достаточной проводимости, чтобы отводить ток из конденсатора через очень малую индуктивность; получается дальнейшее расширение плазмы, пока, наконец, напряжение на электродах не упадет. Для конденсаторной энергии 10—20 *вт · сек* при напряжении 8—12 *кв*, емкости 0,3 *мкф* сопротивление искры при протекании половины заряда по Теплеру

$$R_F = \frac{KlP}{\frac{1}{2}CU}.$$

Апериодическое граничное сопротивление этого разрядного контура

$$R_{ap}=\sqrt{\frac{4L}{C}}=\sqrt{\frac{0{,}12\cdot10^{-6}}{0{,}3\cdot10^{-6}}}=\sqrt{0{,}4}\approx0{,}6\ \textit{ом},$$

где $K=0{,}8\cdot10^{-3}$ для аргона;

$l=2$ *мм* — расстояние между электродами;

$P=5$ *ат* (эксплуатационное давление);

$C=0{,}3\cdot10^{-6}$;

$U=9\cdot10^{3}$ *в*;

$R_F=5/9$ *ом* $\approx0{,}6$ *ом*;

$L=0{,}03$ *мкгн*.

Упомянутый выше случай разряда удовлетворяет приблизительно требованию $R_F=R_{ap}$ [Л. 6, 11].

При повышении напряжения свыше 9 *кв* падает R_F вследствие увеличения произведения CU, получаются колебания и тем самым удлинение вспышки. При меньшей нагрузке процесс становится апериодическим, продолжительность вспышки — больше. Наиболее короткое по времени возрастание до максимума, чисто электрически обусловленное данными контура, составляет $^1/_4$ периода. При 0,3 *мкф* и 0,03 *мкгн* продолжительность четверти периода

$$t=\frac{\pi}{2}\sqrt{LC}\approx\frac{3}{2}\sqrt{0{,}03\cdot10^{-6}\cdot0{,}3\cdot10^{-5}}=0{,}14\ \textit{мксек}.$$

На рис. 153 показана осциллограмма подобного разряда, снятая как световой импульс посредством цезиево-сурьмянного вакуумного фотоэлемента. В качестве наполняющего газа применялась смесь $^2/_3$ аргона и $^1/_3$ водорода при рабочем давлении 2 *ат*. Емкость была 0,12 *мкф*, напряжение заряда 9 *кв*. Световые точки как отметчики времени расположены через интервалы 10^{-7} *сек*. Возрастание происходит приблизительно за 10^{-7} *сек*, через десять точек, т. е. за 1 *мксек* свет уменьшается приблизительно на $^1/_3$.

Система зажигания должна способствовать быстрой ударной и фотоионизации. Для зажигания по системе, показанной на рис. 151, необходимо положительный импульс напряжения приложить к аноду. Под влиянием круто возрастающего напряжения зажигания (30 *кв* — импульсы максимальной мощностью 500 *кв*) при пробив-

ном напряжении около 4 *кв* (между электродом зажигания и главным электродом) металл анодного штифта излучает электроны к электроду зажигания с более положительным зарядом с одновременным излучением ионизирующего ультрафиолетового излучения в области 1 000 Å [Л. 47, 48, 49, 52]. Это излучение поглощается с половинной величиной радиуса действия 2 *мм* при

Рис. 153. Излучения света при искровом разряде импульсной лампы по рис. 151—152.

Наполнение: аргон + 1/2 H_2, давление наполнения 2 *ат*; *C* 0,12 *мкф*; время возрастания 10^{-7} *сек*; спадание с максимума до 1/*e* 1,2 *мсек*; осциллограмма снята с помощью цезиево-сурьмяных вакуумных фотоэлементов; метки времени 10^{-7} *сек*.

2 000 торр давления наполнения или 6 *мм* при 760 торр.

Зона ионизации излучением показана на рис. 151. Она представляет собой проводящую плазму с анодным потенциалом и способствует сразу следующему пробою с катода к этой плазме.

Во времени инерция этого пробоя должна быть менее 10^{-9} *сек* [Л. 51]. Противоположный электрод в системе зажигания на рис. 151 должен быть отрицательным для хорошей геометрии искры.

Положительный противоположный электрод дает нестабильные главные искры, непригодные для освещения оптических систем. Поэтому анодное зажигание имеет преимущества для хорошо центрированного по оси искрового разряда.

Рабочее включение подобного разрядника по рис. 152 обеспечивает цепь зажигания посредством импульсного разряда тиратрона на 200 *а* при напряжении около 3 *кв* и максимальной мощности $(6 \div 8) \cdot 10^5$ *вт*. Этот импульс согласуется трансформатором с волновым сопротивлением *z* кабеля вблизи искрогасительной камеры, анало-

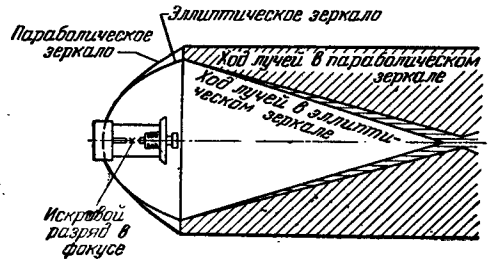


Рис. 154. Излучение оптическими зеркалами (эллиптическое и параболическое зеркала с одинаковым фокусом) посредством искровых разрядов высокого давления, по форме приближающихся к точечному разряду.

гично трансформируется на высокое значение импеданца и при крутом нарастании положительного импульсного напряжения зажигания подводится к электроду зажигания.

Подобный *RC*-член в цепи зажигания стабилизирует электродный потенциал после разряда. Геометрическое излучение эллиптического зеркала от точечной искры схематически показано на рис. 154, а также показано параболическое зеркало. Наибольшая рабочая частота камеры по рис. 152 около 2 000 искр в 1 *сек*. Для очень больших серий искр с требуемой быстрой деионизацией примесь электроотрицательных газов непригодна, так как они быстро разлагаются под влиянием излучения и бомбардировки ионами. Можно применить удаление ионов, предложенное в свое время Марксом для искровых генераторов высокой частоты, потоком газа или воздуха по рис. 155.

При энергии разряда 3 *вт·сек* можно в этом случае поддерживать частоту вспышек 3 000 вспышек в 1 *сек* в течение 5 *сек*; наибольшая достижимая частота вспышек составляет для промывающего газа со звуковой

скоростью на электродах около 50 000 вспышек в 1 *сек* при меньшей энергии искры 0,1 *вт*. Также и этот режим работы может поддерживаться несколько секунд; граница обусловлена нагревом баллона, возникающим вследствие поглощения излучения. После каждой серии вспышек (общее значение около 20—25 *квт · сек*) необходим перерыв на несколько минут для охлаждения.

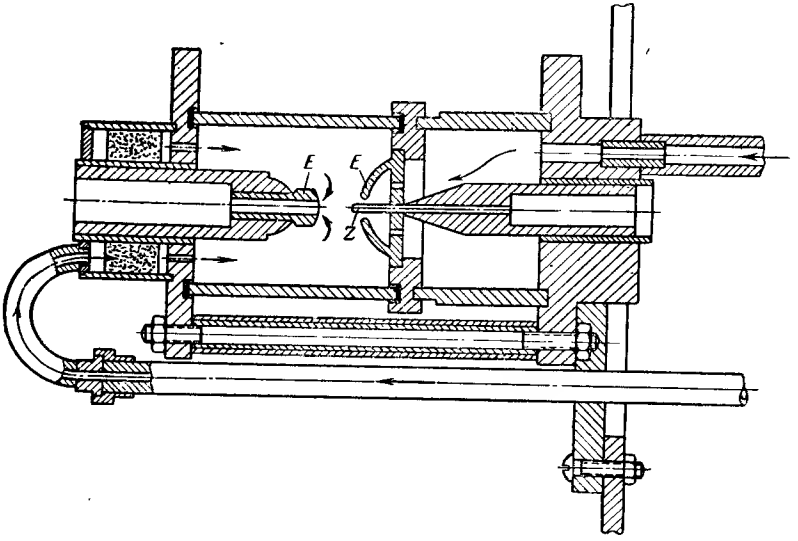
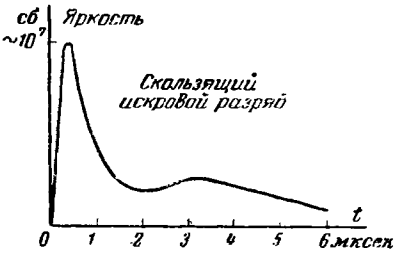


Рис. 155. Импульсная лампа с затухающим разрядом (по Марксу и Фрюнгелю). Между обоими электродами проскакивает искра, когда искра зажигания возникает между электродом зажигания *Z* и охватывающим его чашеобразным электродом *E*. Стрелками показано направление потока воздуха.

На рис. 156 показана зависимость излучения света в синей части спектра от времени (Gs · Sb—умножитель) искрогасительной камеры по сравнению с двумя другими употребительными системами. Фронт нарастания приблизительно в 3 раза круче; также и затухание происходит быстрее. Процент излучения от общего количества для отдельных интервалов времени показан справа на рисунке.

Искра в искрогасительной камере при наполнении аргоном, имеет более высокую цветовую температуру ($<10^5$ ° K) чем подобный скользящий искровой разряд

с главной эмиссией в средней части. Ультрафиолетовая оптика (алюминиевое зеркало с линзой Шмидта из пластмассы и ультрафиолетовый фильтр или флуоресцентная фотография) позволяет уменьшить продолжительность вспышки до величин менее 0,2 *мксек*.



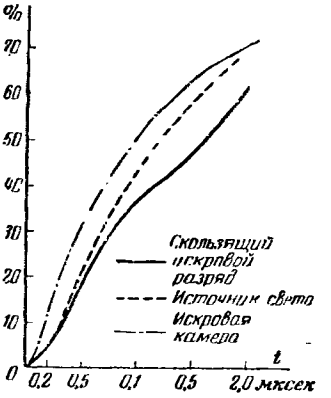


Рис. 156. Зависимость излучения света от времени при скользящем искровом разряде, капиллярном искровом разряде и искровом разряде высокого давления (Фрюнгель).

Максимальная яркость в зависимости от давления при аргоне $2 \cdot 10^7$ *сб* при 1 *ат*, $1{,}5 \cdot 10^8$ *сб* при 10 *ат*. Яркости для CO_2 и CH_4 составляют только 0,3 или 0,1 этой суммы [Л. 50].

Присущие всем системам длинные «хвосты» на диа-

граммах свет — время можно устранить только путем внешнего воздействия; они являются затуханием светящихся групп ионов без существенного электрического влияния; возможно отсечение через 2—3 *мксек* при протекании газа со звуковой скоростью.

Общее устройство такой искрогасительной камеры с параболическим или эллиптическим зеркалом и конденсаторами показано в разрезе на рис. 157, 158.

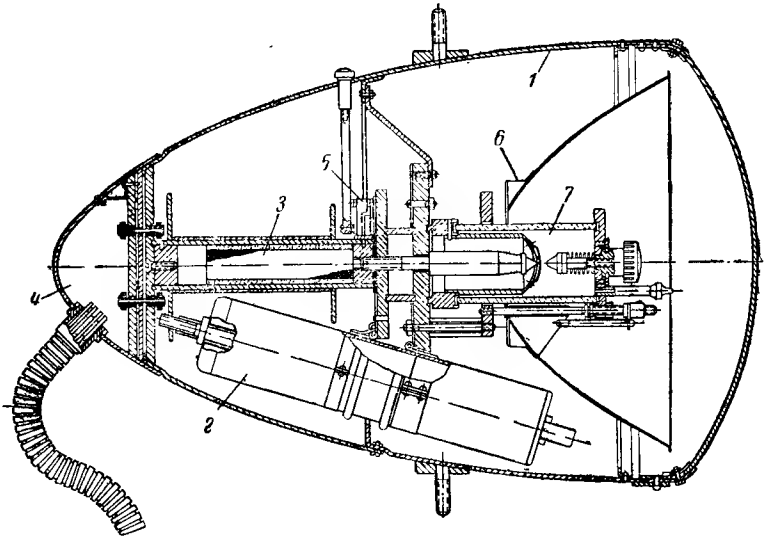


Рис. 157. Импульсная лампа с разборной искрогасительной камерой, импульсным конденсатором и трансформатором зажигания (по Фрюнгелю).

1 — корпус лампы; *2* — импульсный конденсатор (имеется пять подобных конденсаторов с экранирующими цилиндрами); *3* — трансформатор зажигания; *4* — контакты для подключения тока; *5* — переключатель конденсаторов; *6* — детали крепления зеркала; *7* — разборная искровая камера.

Пять групп конденсаторов *2* расположены по окружности вокруг оси лампы и собраны с помощью двух дисков; индуктивность каждого конденсатора компенсируется тем, что внешние обкладки отведены назад к середине благодаря экранирующим посеребренным металлическим гильзам. Импульсный трансформатор *3* для зажигания находится за искрогасительной камерой *7*; переключатель *5* позволяет менять емкость четырьмя ступенями в зависимости от средней или кратковремен-

ной нагрузки. Искрогасительная камера 7 с кварцевым цилиндром и силиконовыми уплотнениями и керамической нижней частью выдерживает продолжительное время температуру 250° С, соответствующую продолжительной нагрузке 200 *вт*. Параболическое или эллипсоидальное зеркало сменяемо. Через ленточный кабель с наименьшим волновым сопротивлением к лампе может быть подключен конденсаторный блок для повышения количества света в 10 раз при увеличении продолжительности вспышки в 3 раза.

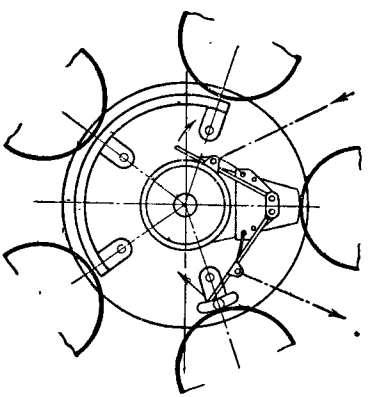


Рис. 158. Переключатель конденсаторов лампы по рис. 157.

Для очистки и смены электродов разрядная система может быть разобрана. Благодаря этому эксплуатационные расходы снижаются.

Восстановление оплавленных камер (сосудов) для больших динамических сил при максимальном токе 6—10 000 *а* обходится очень дорого (разрушение молибденовых вводов у кварцевых ламп). Световое излучение искры при одном и том же напряжении конденсаторов возрастает с расстоянием между электродами; наибольшей точности искровой разряд достигает незадолго до начала самостоятельного разряда; давление наполнения и расстояние между электродами могут поэтому находиться в пределах 0—1 *ат* и 0—15 *мм*.

Большие лампы для энергии разряда до 1 000 *вт·сек* могут изготовляться лишь с ограниченной точностью старта ($1 \cdot 10^{-6}$ *сек*), так как вследствие большого требуемого расстояния между электродами не может быть гарантировано зажигание в пределах досягаемости ультрафиолетового излучения искры зажигания. Сопротивление искры всегда находится ниже границы апериодической области; продолжительность вспышки составляет 3 *мксек* и более. Однако обеспечивается крутое нарастание. На рис. 159 показана 1 000-ваттная лампа со

снятым зеркалом, стирофлексовой конденсаторной батареей и искрогасительной камерой с пластмассовым цилиндром. Стеклянные и кварцевые цилиндры легче растрескиваются под влиянием звуковых волн, чем плексигласовые из астралона, имеющие некоторую пластическую деформируемость, и поэтому следует предпочитать их при сильных отдельных единичных вспышках, при которых почти не наступает нагрева.

Несмотря на возможность легко очищать искрогасительную камеру, охотно применяют электродный материал, обладающий меньшей склонностью к распылению, которое уменьшает прозрачность кварцевого цилиндра. Инертный газ преимущественно вблизи электродов легко ионизируется и действует химически как галоген. Он образует с электродным металлом быстро разлагающиеся парагалогенные соединения, которые осаждаются после их распада на стенках сосуда в виде металлической пыли. На чистый никель и чистый кристаллический вольфрам мало влияет химическое воздействие, и очистка кварцевого цилиндра требуется только через 20 *ч* непрерывной работы, т. е. около 10^7 искр. Работы выхода вольфрама 4,55 *в* и никеля 5 *в* достаточно малы, так

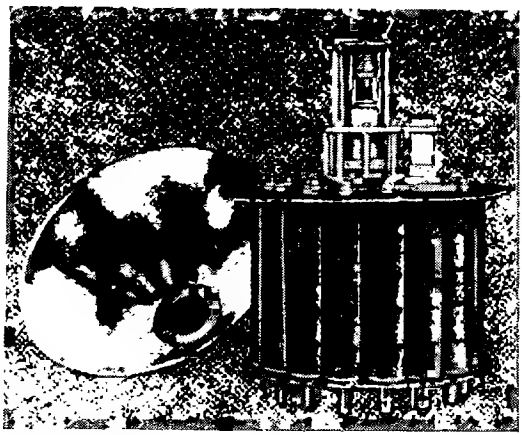
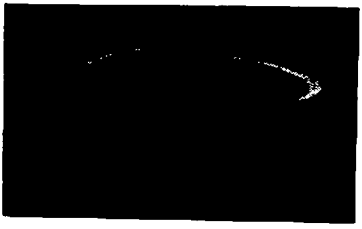
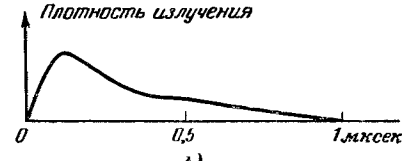


Рис. 159. Импульсная лампа на 1 000 *вт · сек* с искрогасительной камерой высокого давления.

Прозрачный цилиндр из плексигласа, имеющего большую прочность по отношению к искровым импульсам, рядом с лампой — алюминиевый параболический рефлектор с рассеивающей шероховатой поверхностью (по Фрюнгелю).



a)



b)

Рис. 160.

a — излучение света в зависимости от времени вспышки в ксеноне при давлении наполнения лампы около 20 *ат* и емкости разряда 0,01 *мкф*; *b* — излучение света разборной лампой, наполненной азотом; 0,1 *мкф*; желто-зеленый спектр. Развитие во времени быстрее, чем у ксенона; напротив, максимальное излучение меньше.

что сильное ультрафиолетовое излучение менее 2 700 и соответственно 2 500 Å создает усиленную электронную эмиссию и расширение канала. Серебро, имеющее сродство с галогенами, непригодно для искрогасительных камер с инертным газом.

Сокращение продолжительности вспышек при одновременной потере света возможно при наполнении N_2, CO_2 или CH_4. У этих газов быстрая рекомбинация ионов и более короткие продолжительности вспышек, как показано на осциллограммах на рис. 160 и 161. Их цветовая температура (около $3\times\times10^4$ °K) ниже, чем при обычно применяемом аргоне. Спектры максимумов сплошные, однако в фотографически действенном интеграле светового потока, особенно в ультрафиолетовой части, накладываются в спектре линий металла и газа, которые появляются в более поздней фазе искры. Однако оба газа быстро разлагаются и непригодны для общего числа вспышек более 10^4. При очень высоких максимальных токах и особенно при наполнении криптоном и ксеноном получают во всей спектральной области почти полный непрерывный спектр. На рис. 161 показаны некоторые осциллограммы протекания вспышки для Ar, Kr и N_2.

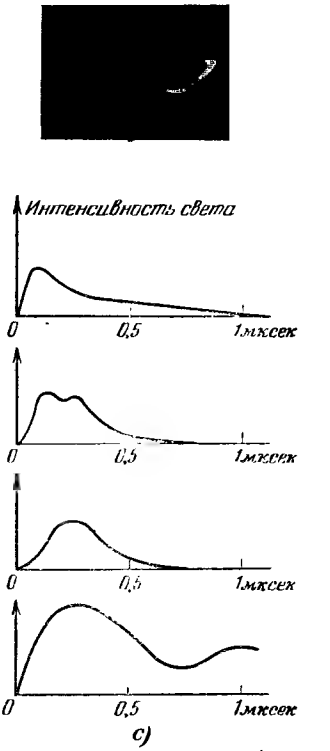


Рис. 161. Осциллограмма излучения света разборной лампы в зависимости от времени; 0,1 *мкф*; наполнение: N_2, CO_2 и Kr. Излучение при наполнении N_2 и CO_2 подобно; наполнение криптоном дает большую отдачу, однако более длительный ход во времени.

На рис. 162 показан фотометрированный спектр при максимальных импульсах 20 000 *а*. Вплоть до несуще-

ственных слабых наложений многократно ионизированных ультрафиолетовых излучений такие импульсные разряды можно считать образующими непрерывный спектр, действующий на фотопленку.

Если снимающийся фильм быстро передвигается посредством вращающегося зеркала или барабанной камеры, то на отдельные зерна бромистого серебра воздействует не полностью вся вспышка, а только спектральное излучение. Эти спектры-максимумы, т. е. спектры искровых разрядов в момент их наибольшего светового излу-

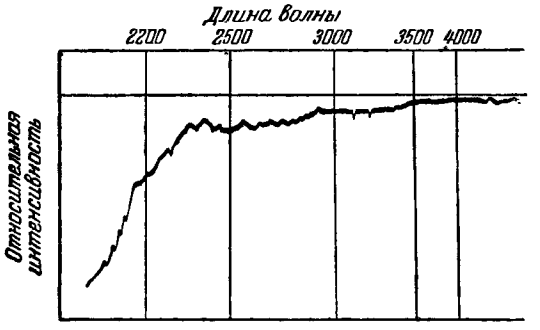


Рис. 162. Фотометрическое спектральное распределение интенсивности излучения света искрового разряда в ксеноне при 20 000 *а* и высоком давлении.

чения, отличаются от тех, которые были получены на спектрографе фотографическим путем, так как в воздействующем на фотопленку излучении света имеются медленно затухающие, электрически только слабо возбуждаемые линии электродного металла; напротив, в максимальном спектре их нет. Это чистый газовый спектр в состоянии высокой ионизации. Посредством лампы-вспышки, двойного монохроматора и осциллографа можно снять подобные спектры (см. рис. 191, 192, 193). Они показывают, что для наибольшего светового излучения в видимой части спектра следует предпочитать ксенон, для особенно хорошего излучения в сине-фиолетовой спектральной области CO_2 и Ar, для ультрафиолетового излучения следует предпочитать CO_2 вместо Ar. Снимки имеют значение и с фотографической стороны, если сразу при переходе через ячейку Керра срезать «хвост»

максимума света. Эти снимки также показывают, что нужно предпочитать в фототехнике сине-фиолетовую или ультрафиолетовую части спектра для наиболее короткого по продолжительности освещения.

Главными отличительными признаками описанной выше техники получения искровых разрядов являются следующие.

1. Малый размер искры для освещения оптическими зеркальными или линзовыми системами, применимость эллиптических и параболических зеркал, используемый осесимметричный пространственный угол более 80°.

2. Короткие вспышки (<1 *мксек*).

3. Почти вертикальное нарастание светового излучения после зажигания.

4. Чрезвычайно большая яркость, до $1{,}5 \cdot 10^8 \cdot$ *стб*.

5. Точность зажигания $<10^{-7}$ *сек* $\div 3 \cdot 10^{-8}$ *сек*.

6. Можно менять газ наполнения для цветовых температур между $3 \cdot 10^4$ и $1{,}5 \cdot 10^5$° К и самых коротких вспышек.

7. Изменяемое давление наполнения, например точечный искровой разряд для теневой фотографии при высоком давлении наполнения.

8. Малые эксплуатационные расходы, так как возможны смена электродов и очистка.

9. Произвольная добавка водорода для спонтанного сокращения продолжительности послесвечения у искровых разрядов в инертных газах [Л. 90].

5. УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВСПЫШЕК

Высокочастотный аппарат для вспышек с синхронизированными разрядами конденсатора.

Объем информации высокочастотных фильмов, применяемых для записи во времени быстро протекающих процессов, применение которых все расширяется, растет пропорционально площади отдельного снимка, общему количеству снимков и частоте снимков и, напротив, падает при нечеткости, вследствие движения объекта во время освещения отдельного снимка и зависит от величины зерна. Если величина зерна обусловлена техникой проявления, а общее количество и площадь поверхности пленки зависят от аппарата, то четкость изображения при любой большой частоте можно улучшить путем при-

менения очень коротких вспышек для каждого отдельного снимка. Необходимо поэтому превращать разряды конденсатора в яркие искровые разряды-вспышки, согласовав их с частотой кадров.

Применяемая максимальная частота у фотоаппаратов с оптическим выравниванием при нормальной пленке (18×24 *мм*) 3 000 кадров в 1 *сек*, при пленке малых размеров (6×8 *мм*) 16 000 кадров в 1 *сек* обусловлена прочностью на разрыв пленки при ее движении. Разработка более прочных пленок позволяет повысить эту частоту на 50%, т. е. при малоформатном фильме до 24 000 кадров в 1 *сек* *.

Вспышки, синхронизированные с частотой съемки кадров для получения высоких скоростей съемок, были предметом дальнейшего исследования.

Исходя из определенной формы источника искрового светового разряда, в качестве искроразрядной камеры была выбрана камера:

Продолжительность вспышки	1 *мксек*
Электрическая индуктивность разрядной системы	0,03 *мкгн*
Емкость системы	0,07/0,15/0,3 *мкф*
Напряжение заряда	8—10 *кв*
Давление газа	1—5 *ат*
Зажигание	Анодное через управляемый импульс напряжения

Оплавленные баллоны разрядника менее пригодны для получения коротких вспышек с энергией разряда более 1 *дж*, так как они у проводов имеют слишком большую индуктивность, чтобы получить разряд в апериодической области, как требуется.

Впаянные провода не дают возможности применять сильные импульсы тока величиной 5—10 *ка*, как это необходимо для превращения энергии искры при продолжительности <1 *мксек*. Также их теплоемкость очень мала. Поэтому для получения указанных значений было предусмотрено установление концентрических съемных искрогасительных камер, которые изготовляются полностью газонепроницаемыми путем применения днища из спеченной керамики и силиконовых уплотнений.

---

* Более высокие скорости вообще достигаются при расчленении стандартных форматов. Исключение представляют системы с вращающимися зеркалами.

Большая теплоемкость, достигнутая путем щедрого применения электродного металла, а также металла, проводящего ток, является дальнейшим преимуществом, так как это необходимо для поглощения тепла, освобождающегося при сериях вспышек. На рис. 163 показан вид разборной разрядной лампы с конденсаторной батареей, трансформатором зажигания, заменяемыми электродами и устройством для перемещения с целью изменения расстояния между электродами в зависимости от давления наполнения.

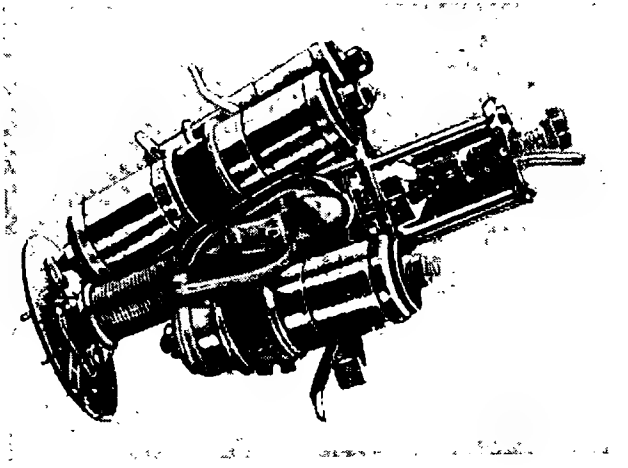


Рис. 163. Импульсная лампа по рис. 157 с конденсаторной батареей, разборной искрогасительной камерой, регулируемыми электродами и с давлением газа, которое можно изменять по выбору. Сзади по оси лампы находится импульсный трансформатор.

Введение искрогасящего разрядника (см. разд. «В») в разрядный промежуток искрогасительной камеры вначале кажется нецелесообразным, однако оно оказалось, как показано ниже, при применении газов с различной скоростью ионизации в искровом разряднике и искрогасящем разряднике средством для получения очень больших управляемых серий искровых разрядов. Искровой световой разрядник должен работать в атмосфере инертного газа, искрогасящий разрядник, напротив, — в атмосфере водорода.

Сокращение продолжительности вспышки путем добавления водорода к инертному газу описано в [Л. 90].

Дальнейшую разработку конструкции, показанной на рис. 163, представляет разборная конструкция лампы с искрогасительной разрядной камерой (рис. 164). На рисунке видны снаружи импульсные конденсаторы, по оси лампы — диски искрогасящего разрядника. Видимые на рисунке вверху рукоятки служат для переключения емкости.

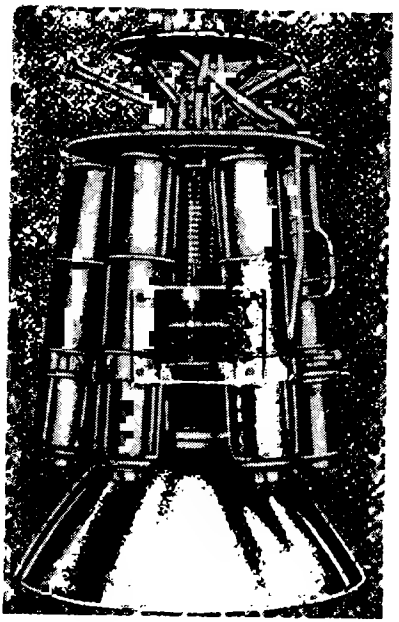


Рис. 164. Высокочастотная импульсная лампа с искрогасящим разрядником. Снаружи видны импульсные конденсаторы, по оси — искрогасящий разрядник. Искровая камера закрыта параболическим зеркалом.

На рис. 70 представлена импульсная лампа, у которой имеются преимущественно керамические элементы конструкции и которая разработана для работы при высоком тепловом режиме [Л. 72]. Преимущество этой конструкции лампы состоит в том, что свет искры доступен через полусферическое пространство, так что оптика большой апертуры может быть освещена, например, для снимков в интерференционных системах или теневым методом.

На рис. 165, 166, 167, 168 показан весь описанный ниже аппарат для вспышек с большой частотой со схемой отдельных элементов.

Со световой искровой камерой последовательно включен в качестве коммутирующей искровой камеры искрогасящий разрядник (рис. 165) из 20—30 секций с водородным наполнением атмосферного давления. Искрогасящий разрядник из 20 секций с расстоянием между электродами 0,05 *мм* и электродами из металла с малой фотоэлектрической ра-

ботой выхода (например, восстановленная медь и определенные цинковые сплавы, в данном случае — также латунь) оказался выгодным при рабочем напряжении до 9 *кв*. Малая электрическая работа выхода обеспечивает малоинерционное возникновение искры.

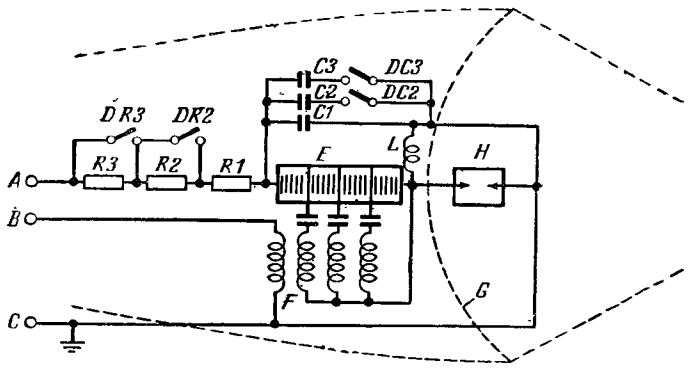


Рис. 165. Схема аппарата для получения вспышек с большой частотой.

A — клемма подключения конденсаторов; *B* — клемма подключения регулирующего напряжения; *C* — заземление; *DR2*, *DR3* — выключатели для шунтирования сопротивлений R_2 и R_3; *DC2*, *DC3* — выключатели для конденсаторов C_2 и C_3; *E* — коммутирующая искровая камера; *F* — импульсный трансформатор; *L* — зеркало; *H* — световая искровая камера; R_1, R_2, R_3 — сопротивления; C_1, C_2, C_3 — зарядные конденсаторы.

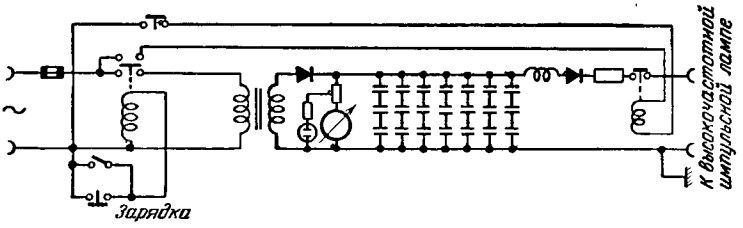


Рис. 166. Устройство для питания импульсной лампы с емкостным накоплением энергии, 3 000 *дж*.

Для управления таким искровым разрядником, который включен последовательно с собственно осветительным разрядником, необходимы очень мощные импульсы. От одного водородного тиратрона с импульсной мощностью около 100 *квт* можно проводить одновременно управление через импульсный трансформатор

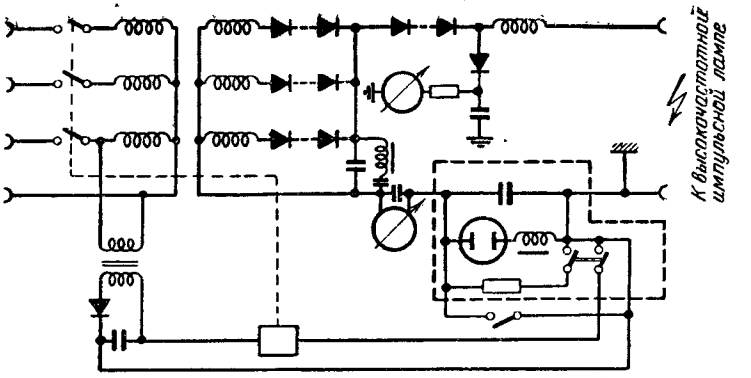


Рис. 167. Устройство для питания импульсных ламп при длинных сериях вспышек. Трехфазный выпрямитель обеспечивает повторный заряд лампы от сети. Потребляемая мощность, например, составляет 50 *квт* при 10 000 вспышках в 1 *сек* и 5 *дж* энергии. Кулонметр с такой же термической характеристикой, как и у искровых разрядников лампы, отключает источник питания для защиты лампы после достижения заранее установленного количества энергии (*кдж*).

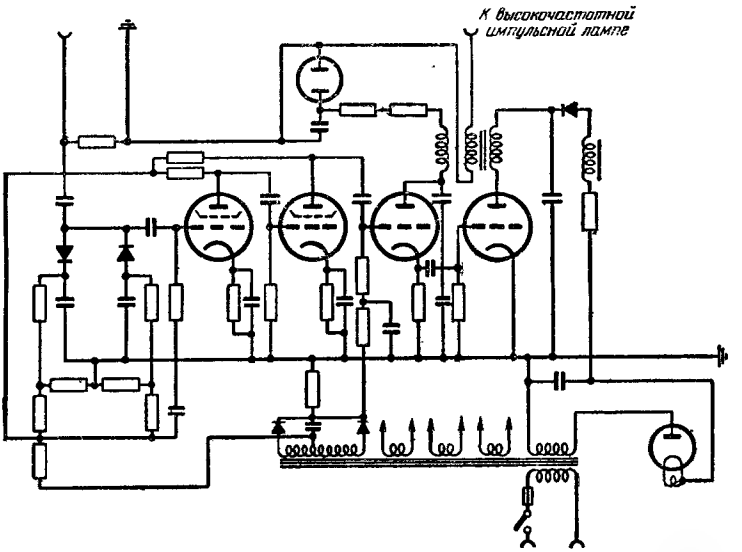


Рис. 168. Простое регулирующее устройство для зажигания искрогасящего разрядника при заданной частоте. Мультивибратор управляет быстродействующим малым гелиевым тиратроном, который в свою очередь управляет мощным тиратроном для получения искры зажигания.

с четырьмя вторичными обмотками трех электродов водородного искрового разрядника и электрода аргонового искрового разрядника таким образом, что искры возникают с отклонением по времени менее $3 \cdot 10^{-8}$ *сек*.

Водородный тиратрон управляется гелиевым тиратроном с усилителем, так что возможно управление от слабых переменных напряжений, например от электромагнитных систем в съемочном киноаппарате или иных генераторов звуковой частоты. При ограничении по амплитуде на входе устройство работает при всех прилагаемых входных напряжениях 0,1—15 *в*; между самими низкими частотами и зависящей от лампы наибольшей частотой 100 000 вспышек в 1 *сек*. не требуется переключение коммутационных звеньев и посредством управляющей сетки могут быть получены определенные серии вспышек, а также отдельные вспышки. Для всех таких случаев, при которых только необходимы короткие серии вспышек (рис. 166) без особой синхронизации и без стабильности частоты, иногда достаточно искрогасящий разрядник и искрогасящую камеру использовать в самоопрокидывающемся режиме, при котором заряд для серии вспышек берется от большой батареи через добавочное сопротивление с накопительным дросселем и импульсным выпрямителем. Это приводит примерно в течение разрядки первых 10% количества электричества зарядного конденсатора к только грубо соответствующей заданной частоте вспышек, которая может быть повышена до 25 000 вспышек в 1 *сек*.

Практически неограниченное количество вспышек дает сетевое устройство согласно рис. 167 с выпрямителем тока большой силы, причем он состоит из трансформатора с высоким насыщением железа, с самым малым количеством меди и малым омическим сопротивлением, который отдает через трехфазный выпрямитель достаточно сглаженный постоянный ток для зарядки конденсаторной батареи импульсной лампы. Чтобы измерять количество вспышек, зарядный ток пропускается через счетчик кулонов, который вследствие установки шкалы предыскания после прохождения заранее установленного числа кулонов в соответствии с желаемым количеством вспышек в лампе автоматически отключает сетевое

устройство. Общее количество вспышек лампы обусловлено теплоемкостью. При 50 *квт·сек* вся система нагревается примерно до 100° С. Эта константа позволяет при 1 *дж* за 1 вспышку производить до 50 000 вспышек. При меньшей частоте вспышек длительная эксплуатация возможна при средней нагрузке 250 *вт*, например при 2 500 вспышках в 1 *сек* при энергии разряда 0,1 *дж*. Для частот менее 1 000 *гц* водородная искровая камера закорачивается и работает при простом управлении посредством анодного зажигания с обычным прибором зажигания.

Одна и та же комбинация приборов позволяет поэтому управлять получением частот 0—70 000 *гц* *. Светящийся искровой разряд находится в фокусе освещаемого зеркала, которое заменяемо. К каждой лампе придается эллипсоидное зеркало с фокусным расстоянием около 60 *см* из чистого алюминия с шероховатой поверхностью с высокой отражательной способностью.

Регулировка электрода зажигания не требует особой точности. Должен оставаться зазор около 0,4 *мм*. Вследствие предварительной разрядки импульса зажигания в нем возникает коротковолновое ультрафиолетовое излучение которое служит для подготовки плазмы разряда и способствует перекрытию плазмой, исходящей от катода к аноду. Небольшие статистические колебания местоположения искрового разряда так выравниваются шероховатостью зеркала, что освещение предмета при каждой вспышке постоянно. Ось искрового разряда остается постоянной (± 1 *мм*) при давлении наполнения 2 *ат*; величина отключения оси ниже диаметра искры около 3 *мм*. При увеличении частоты положение искры становится стабильнее вследствие статистически более высокой проводимости плазмы из-за наличия остаточных ионов. После разработки этой установки выбрана аппаратура с необходимой регулировкой освещения для скоростных съемочных камер с очень малыми длительностями вспышек для получения достаточной отчетливости снимка, нарушаемой движением; практически сняты ограничения по общему количеству вспышек и длине пленки.

---

* Предельная частота может быть повышена до 300 000 вспышек в 1 *сек* путем применения схемы Маркса при неуправляемом режиме для коротких серий вспышек.

После соответствующего переключения установку можно использовать как обычный суперстробоскоп, и тогда он пригоден вплоть до нулевой частоты. Вследствие малой продолжительности вспышки можно также получать достаточно хорошее качество снимков с простой барабанной камерой без оптического выравнивания. На рис. 169 показана барабанная камера для освеще-

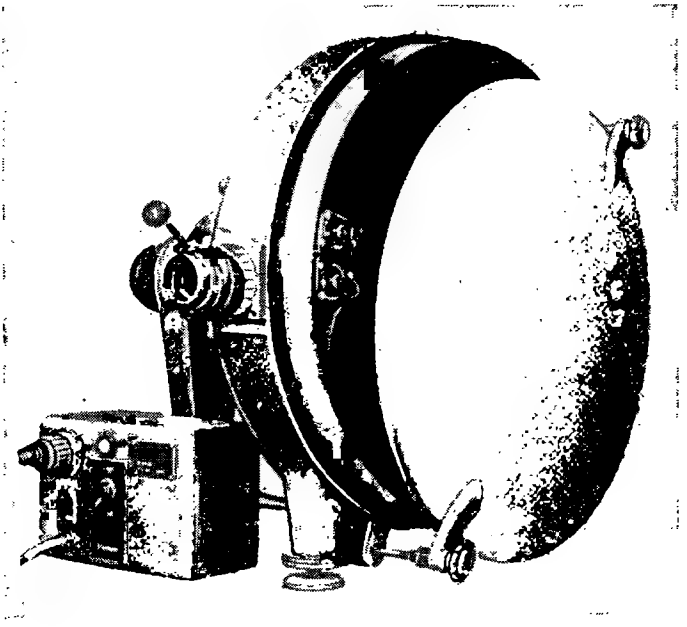


Рис. 169. Барабанная камера с открытой крышкой. Видны барабан с натянутой пленкой 35 *мм* и кассеты.

ния вспышками при максимальной скорости 100 *м/сек* и пленке длиной 1,5 *м*. При 3000 *об/мин* барабана камеры, т. е. при 50 *об/сек*, и при пленке длиной 1,5 *м* получается $v=75$ *м/сек*, т. е. при формате снимка 20×24 (высота снимка 20 *мм*) 75 снимков при частоте вспышки $\frac{75\,000\ мм}{20\ мм/сек}=3750$ вспышек в 1 *сек*, причем смещение снимка при скорости пленки 75 *м/сек* во вращающемся устройстве при времени освещения 1 *мксек* будет 75 *ммк*.

При нормальном проявлении соответствующая нерезкость может считаться допустимой. При меньшей высоте снимка может использоваться большая частота кадров, например при 10×24 *мм* 7 500 кадров в 1 *сек* при 150 снимках на периферии.

В описанном виде управляемый конденсаторный разряд пригоден для точно синхронизированных световых вспышек. Для того чтобы увеличить частоту световых вспышек, что особенно требуется для процессов разрыва, а также для сокращения продолжительности световых вспышек необходимы были дальнейшие усовершенствования.

Три мероприятия позволили повысить производительность по объему информации:

1. Особенно для работы барабанных камер необходимо эффективную продолжительность световой вспышки ограничить 1 *мксек* или меньше и устранить последующее свечение «хвостов», известных при разрядах в инертных газах. Для этого к инертному газу (аргону) искровой разрядной камеры добавляется $^1/_3$ по объему водорода (рис. 153). В связи с этим в искре в атмосфере с преобладанием Ar^+ возникает реакция $2Ar^+ + H_2 = 2ArH^+$ [Л. 90], причем Ar^+ действует тогда как псевдогалоген и соединяется в псевдосоляную кислоту, которая со своей стороны медленно, но не в видимой спектральной области, светясь, вновь рекомбинирует в $2Ar + H_2$. В связи с этим процессом можно наблюдать отрывочное прекращение света искры после прекращения подачи тока. Снимки со скоростью пленки 100 *м* в 1 *сек* без оптического выравнивания при добавке H_2 — резкие, без него — смытые и неконтрастные.

При применении всех дополнительных мер можно работать при продолжительности световой вспышки для фотографирования, равной 0,2 *мксек*.

2. Для того чтобы получить резкую отсечку подачи тока, используется упомянутый медный искрогасящий разрядник, работающий в H_2, последовательно со световой искровой камерой с аргоновым наполнением. При токах менее 600 *а* происходит резкое гашение. При применении «быстрого» водорода в искровой камере для включения и гашения, а также «медленной» смеси инертных газов с добавкой H_2 в световой искровой камере значительная часть превращения энергии приходится на

искровой разряд в аргоне со световым к. п. д. 5%. Эмитируется около $250 \cdot 10^6$ *св* в амплитуде, причем объем искры можно произвольно менять, выбирая давление газа.

3. Особый прибор управления был разработан для серий вспышек с частотой до 140 000 вспышек в 1 *сек* с произвольным управлением каждой отдельной искры (синхронизация с перфорацией пленки, акустическими или другими сигналами). При переменном зажигании зарядного тиратрона и тиратрона зажигания (оба тиратрона водородного типа) сделаны невозможными двойные вспышки [Л. 91].

Отражательный элемент у каждого полюса этих ламп гасит разряд сигналом с противоположным знаком, и диодная цепь с блокирующими дроссельными катушками позволяет импульсу мощности, соответствующему $Z=60$ *ом*, попадать в лампы для зажигания искрового разрядника. Отраженный сигнал, возникающий при зажигании искровых разрядников и вызывающий неточность согласования при получении искры, блокируется. В связи с этим внутренняя регенерация в системе прекращается. На рис. 170 показана схема блокировки подобной установки.

Съемку со скоростью 70 000 снимков в 1 *сек* с общим большим числом снимков, а также фильмы с процессами разрушения и поверхностными процессами, с биологическими процессами можно легко проводить с помощью так называемого «стробокина». Разработанная система пригодна для «средних по скорости», но проходящих любое время по длительности процессов и может точно давать серии световых вспышек, начиная от 1 до 200 000 вспышек и удобна в эксплуатации. Точечная форма искрового разряда и одинаковое положение во время всего освещения делают освещение свободным от параллакса. Свет практически холодный и пригоден для биологических целей.

Эта техника применима для управляемой по частоте модуляции последовательности импульсов.

В комплектной искровой лупе времени «Стробокин» серией вспышек можно управлять непрерывно от одной до 50 000 вспышек в 1 *сек*, а при применении описанного выше управляющего устройства — до 140 000 вспышек в 1 *сек* при световой энергии до 8 *вт·сек* на 1 вспышку.

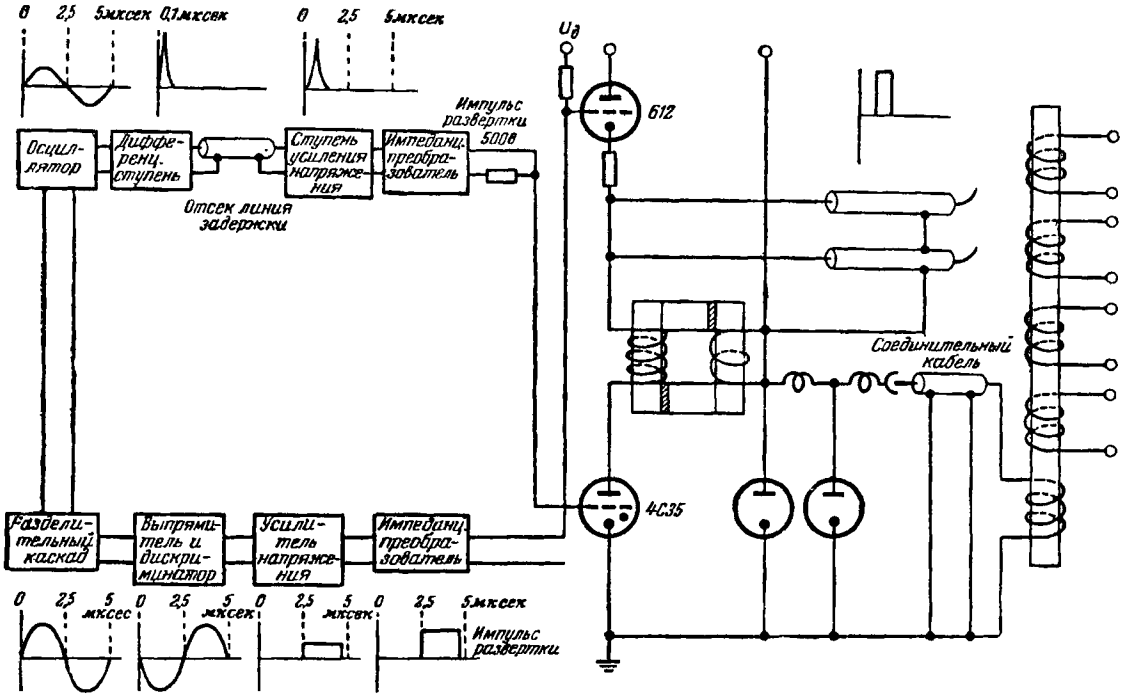


Рис. 170. Схема регулирующего устройства для получения до 140 000 вспышек в 1 *сек*. Заряд конденсатора тиратрона происходит в паузах между искрами; отражательное звено блокирует по отношению к устройству напряжение помех, получаемых при зажигании искрогасящего разрядника.

Получают снимки сравнительно большой величины при большой резкости. Естественно, световые вспышки можно использовать также в замедленном темпе при длительной эксплуатации, чтобы наблюдать визуально. Стробокин применим поэтому в качестве мощного стробоскопа. Главное применение состоит в фотоанализе таких процессов, как колебание, излом, кавитация, интерференционные снимки и снимки при теневом методе, разрыв, дробление, распыление, в аэро- и гидродинамике, а также в баллистике, изучении физиологических и психологических реакций.

Для документальных работ применяют эту технику в качестве точного микроскопа времени, используя кварцевую стабилизацию частоты кадров. Для длинных вспышек (>3 *мксек*) с большой энергией может быть подключен добавочный конденсатор на 80 *вт · сек*.

Так как искровая лупа времени является одной из наиболее важных областей применения управляемых мощных конденсаторных разрядов, то ниже изложено несколько примеров возможных применений.

a) Стробоскопия. Выполнение всех требований стробоскопии с применением световых вспышек — непрерывное регулирование частоты вспышек от 16 до 1 000 *гц* с большой постоянностью, большая яркость при абсолютной резкости, длительная эксплуатация, синхронизация с контактными датчиками — возможно при управляемом искровом разряде, а также без гасящего искрового разрядника. Здесь можно использовать капиллярные лампы с игнитронным или тиратронным управлением. У лупы времени с высокой частотой кадров при этом методе работы, т. е. при длительной эксплуатации со средней нагрузкой, искрогасящий разрядник просто закорачивается.

b) Моментальная фотография с отдельным световыми вспышками. Если хотят сфотографировать быстрый процесс в определенной фазе движения, то искрогасящая камера дает отдельную вспышку электронным путем или в данном случае с помощью замедляющего устройства; при этом освещение объекта производится при времени освещения 1 *мксек* или менее, т.е. получают четкий снимок любого формата.

При некоторых проблемах съемки с помощью дозированного количества серий вспышек на фотографии мо-

жет быть получен процесс движения (например, перемещающиеся объекты на темном фоне). В качестве примеров могут быть приведены здесь рис. 171, 172, 173. Часто применяют эту технику съемок с вращающейся нитью для испытания приборов во всей области частот,

Рис. 171. Выстрел в электрическую лампу — пример моментальной фотографии. При прохождении пулей фотоэлектрического барьера задается начальный импульс в устройство задержки импульсов, которое позволяет получать вспышки с желаемой выдержкой времени (например, 400 *мксек*). Если осветительную вспышку давать непосредственно после попадания пули, то можно измерять на снимке скорость разлета осколков стекла.

так как количество оборотов диска можно определить очень точно.

с) Скоростная высокочастотная съемка с помощью барабанной камеры. Для того чтобы запечатлеть на пленке движение в интересующих нас фазах, достаточно нескольких сотен отдельных снимков. От 100 до 300 отдельных снимков можно еще разместить очень рацио-

нально при сравнительно большом формате на 35-миллиметровой пленке барабана. Если скорость вращения барабана будет выбираться в зависимости от снимка и частоты вспышек, то серия искровых разрядов следует автоматически снимок за снимком на пленке, движущейся со скоростью до 100 *м/сек.*

Рис. 172. При применении поляризованного света напряжения сжатия становятся видны на прозрачных моделях. На моментальной фотографии показана фаза движения динамической импульсной волны через плексиглас спустя 50 *мксек* после попадания пули. Можно хорошо различить продольную и поперечную волны. В направлении попадания материал остается неожиданно свободным от напряжений. Скорость движения фронта импульса 1,5 *км/сек.* Техника съемки такая же, как показана на рис. 130.

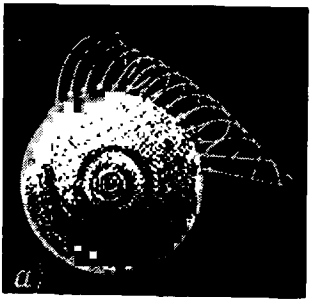
Принцип действия показан на рис. 174. Если желают получить непосредственно фильм, пригодный для показа с точки зрения кинематографии, то можно с помощью оптического синхронизирующего устройства управлять частотой вспышек для пленок 8, 16 и 35 *мм* от перфорации пленки.

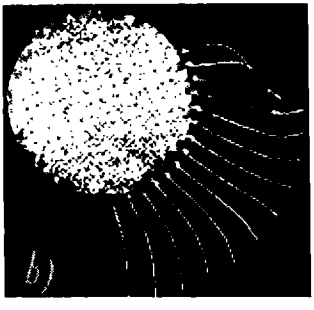
Главные преимущества барабанной камеры по сравнению с камерами с вращающейся призмой с оптическим выравниванием следующие:

1. Высокий объем информации в снимках вследствие сравнительно высокой четкости снимков. Объективы

с большой светосилой, нет потери резкости вследствие отражения призмами или оптического выравнивания. Сменная оптика.

2. Исключительное качество снимков в связи с тем, что возможно применение мелкозернистой пленки со специальным соответствующим проявителем.





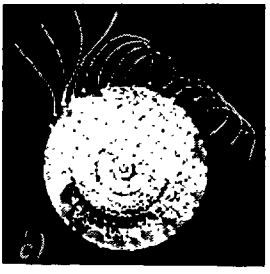


Рис. 173. Эти снимки получены следующим образом: на быстро вращающемся диске (оклеенном черным бархатом) укреплена нить, конец которой ударяется о препятствия справа. «Дозированная» серия вспышек показывает колебания после удара. Рисунок на диске получается благодаря стробоскопическому эффекту, диск — черный.

a — деформация вращающейся нити после удара о препятствие; *b* — нить вновь вытянута благодаря центробежной силе; *c* — натяжение нити после удара.

3. Минимальный расход пленки (1,75 *м* на серию снимков). Возможность немедленного проявления с использованием обычного фотолабораторного оборудования.

4. Точная синхронизация движения с началом и прекращением серий вспышек.

Если необходимо применение пленки большей длины вследствие требуемой большей продолжительности съемки, то используют высокочастотную камеру синхронизованно с прибором для получения световых вспышек. Комбинация высокочастотной камеры со вспышками

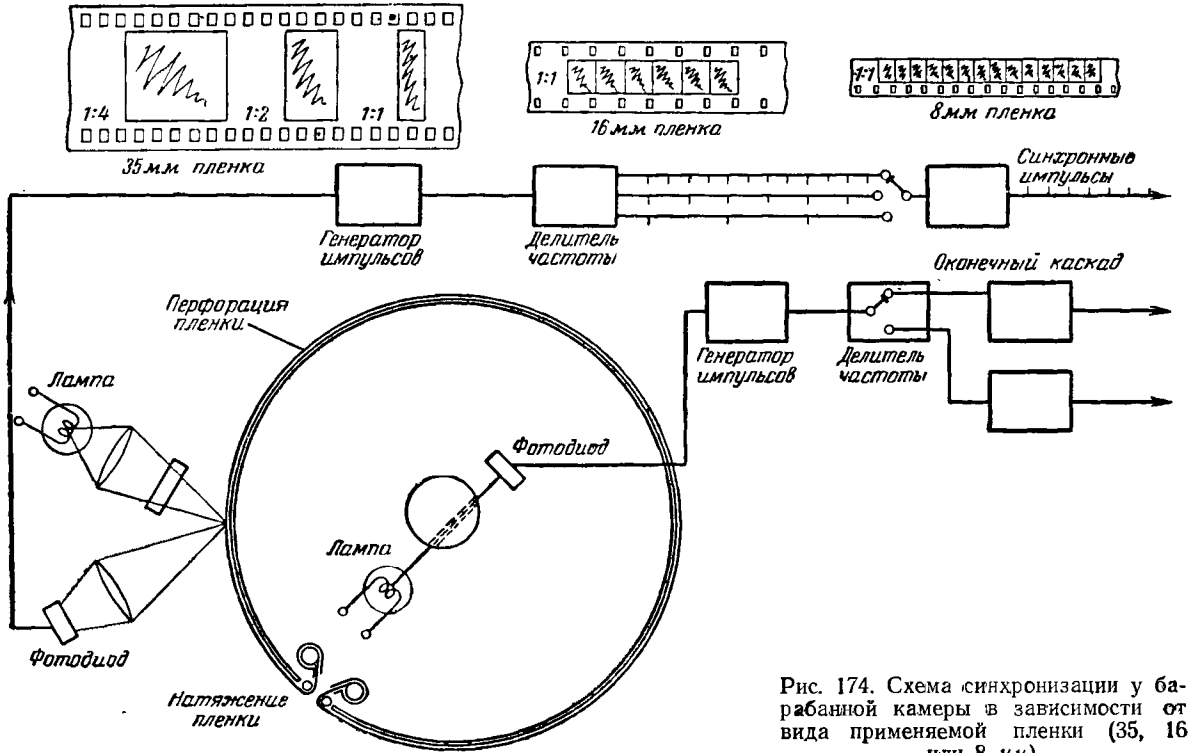


Рис. 174. Схема синхронизации у барабанной камеры в зависимости от вида применяемой пленки (35, 16 или 8 *мм*).

в качестве источника освещения дает преимущества в связи с более высокой частотой снимков и одновременно более высоким количеством снимков (например, до 10 000 отдельных снимков (серия вспышек).

Управление лампой-вспышки происходит здесь от кинокамеры таким образом, что частоты съемок и частота

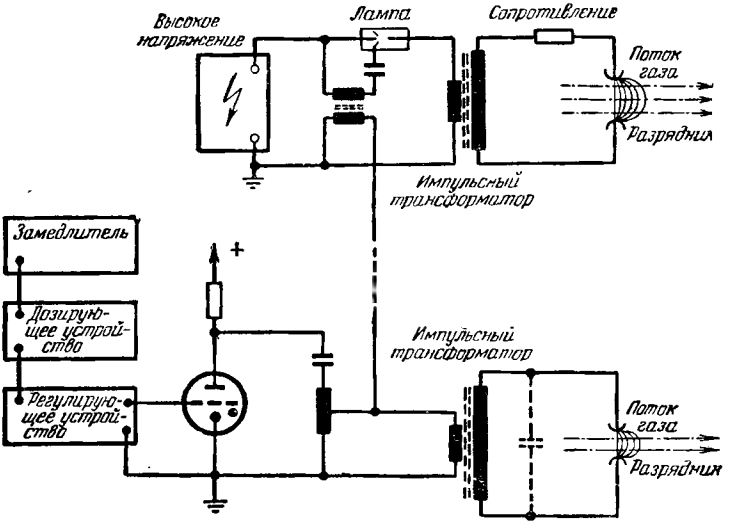


Рис. 175. Получение синхронизированных искровых разрядов высокого напряжения с помощью искрового разрядника. (Приставка к стробоскопу, рис. 170.)

кадров благодаря оптическому и магнитному включению идут синхронно с перфорацией пленки.

Методика управления вспышками у барабанной камеры представлена на рис. 174, причем градуировка предусмотрена в соответствии с количеством перфорационных отверстий на кадр. При этом серия вспышек точно начинается и заканчивается на стыке пленки.

Особенно интересное применение описанных приборов получается, если согласно рис. 175 искровые камеры используются для того, чтобы подводить электрическую энергию от импульсных конденсаторов лампы к импульсному трансформатору высокого напряжения.

Со вторичной обмотки трансформатора получают точно дозированные импульсы высокого напряжения с ве-

личиной напряжения до 250 *кв* при произвольном выборе напряжения. Ширина импульса может быть задана размерами трансформатора и может корректироваться последовательно включенными конденсаторами и демпфирующими сопротивлениями. Благодаря этому можно получать для целей испытаний и исследований в электротехнике любые серии импульсов всех частот и областей напряжения.

Герцог, Веске и Боймельбург [Л. 92, 93, 94] показали, что можно сфотографировать ход потоков воздуха через искровые промежутки. Для этой цели к искровому разряднику, установленному в исследуемом потоке, подводится ограниченная во времени серия импульсов высокой частоты. Плазма первого искрового разряда увлекается газовым потоком, так что следующие светящиеся пути искры указывают фотографически дальнейший путь движущейся плазмы.

На рис. 175 показана принципиальная схема установки. Искровые разряды очень малой длины, около 7—10 *мм,* можно получить с помощью регулирующего устройства и водородного тиратрона.

Благодаря возникающим периодически с большой частотой импульсам напряжения плазма старого искрового пути вновь периодически возбуждается до свечения и дает возможность проводить прямую фотографическую запись соотношений потоков. Для того чтобы, кроме визуальных наблюдений снимков потоков, что является особым преимуществом искрового метода, получить документ фотографическим путем, который можно точно оценить и который дает возможно точную информацию о поведении, положении потока, необходима высокая стабильность частоты. Для минимального влияния помех на поток нужно далее потребовать, чтобы энергия, превращенная в искре, была по возможности минимальной, но все же достаточной по яркости для фотографической съемки. Импульсы напряжения должны быть возможно короче; тем самым одновременно достигается хорошая резкость. Поэтому напрашивалось применить стробокин — прибор для получения серий вспышек. Импульсные трансформаторы используются так, как описано в разд. Е, 2.

Примененный в стробокине импульсный метод позволяет получить с помощью электронных устройств или

кварцевого стабилизатора серии искр с частотой до 140 000 вспышек в 1 *сек*. При этом специальном применении искрогасительная камера, обычно используемая для освещения объектов, применяется только как включающее устройство. Разрядные импульсы длительностью около 1 *мксек* подаются на импульсный трансформатор,

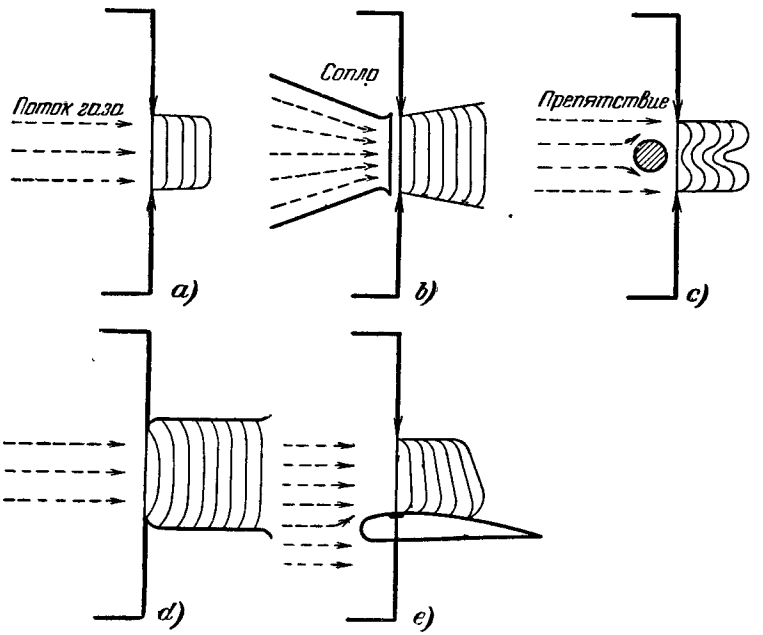


Рис. 176. Примеры получения искровых разрядов по рис. 175; параллельный поток, поток за препятствием, прохождение воздуха через отверстие, поток по профилю.

и напряжение повышается путем трансформирования до ~ 60 *кв*. Для меньших расстояний между электродами можно полученный от тиратрона импульс, обычно применяющийся для зажигания лампового искрового разрядника, подать на первичную обмотку импульсного трансформатора.

На рис. 176 показано схематично несколько примеров применения этого метода [Л. 95, 96].

Так как точная физическая интерпретация сложных процессов разряда в газах выходит далеко за рамки

книги, то в последующем для понимания описанного искрового метода вспышек будут приведены только наиболее важные характеристики искрового разряда в газах. Искровой разряд, длящийся около 1 *мксек*, дает высокоионизированную плазму. Очень высокая вначале плотность носителей заряда в шнуре плазмы очень быстро снижается вследствие диффузии и рекомбинации ионов с электронами. Если за достаточно короткий промежуток времени вновь возникнет импульс напряжения на электродах, то произойдет пробой в плазменном шнуре предшествующей искры, так как в нем будет значительно более высокая проводимость, чем в нормальном состоянии газа. Если в исследуемый поток поместить искровой разрядник, то плазменный шнур за время $1/f$ (f — частота, количество вспышек за 1 *сек*) перемещается на v/f (v — скорость потока, *м/сек*). Таким образом, можно проследить путь первой струи плазмы, образованной путем прямолинейного искрового разряда со вспышкой в потоке. Если искровой разрядник состоит из двух игольчатых электродов, то понятно, что так как каждая искра должна перейти от одного электрода к другому, то увлекаемый потоком плазменный шнур становится все длиннее. Так как, с другой стороны, энергия для каждой искры и тем самым число носителей заряда постоянны, то величина проводимости плазменного шнура с увеличением длины снижается до тех пор, пока она не будет сравнима с проводимостью неионизированного газа. Если это состояние достигнуто, то следующая искра образуется пробоем кратчайшего пути между электродами и начинает образование новой «искровой занавески».

Подобные рассуждения пригодны также, если за препятствием, которое внесено в газовый поток, возникает сильное падение скорости, что принуждает искры идти обходным путем. Тогда может случиться, что искровая вспышка будет искать себе кратчайший путь и не пользуется всей сильно деформированной струей плазмы в качестве пути, а частично обходит ее.

На рис. 177 и 180 показаны искровые пути в однородном, без завихрения, потоке воздуха (сопло пылесоса), на рис. 178 — поток через внесенное препятствие, на рис. 179 — особенно красивый снимок расходящегося потока, омывающего два места помех.

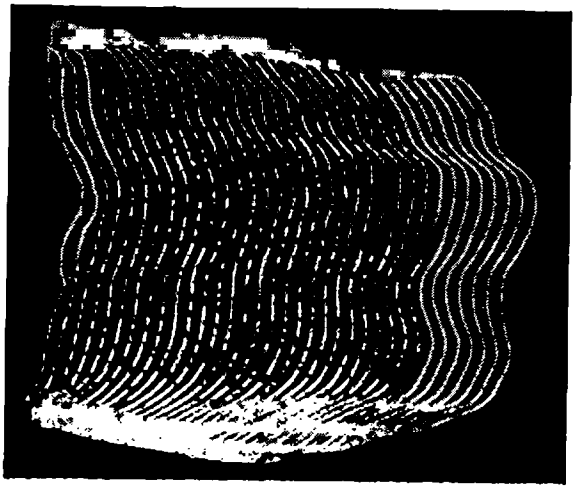


Рис. 177. Стабилизированная кварцем серия искровых разрядов частотой 10 *кгц* при параллельном потоке.

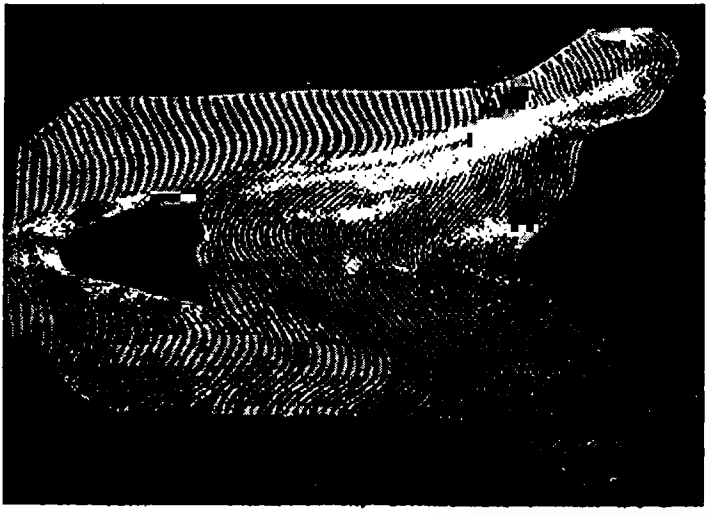


Рис. 178. Стабилизированная кварцем серия искровых разрядов частотой 20 *кгц* позади препятствия.

При фотографической регистрации серии вспышек с помощью барабанной камеры (стробудрум) без оптической компенсации могли быть сделаны два примечательных наблюдения (рис. 181). В момент, когда по причинам, изложенным выше, искра не использует больше как путь имеющийся плазменный шнур, но снова

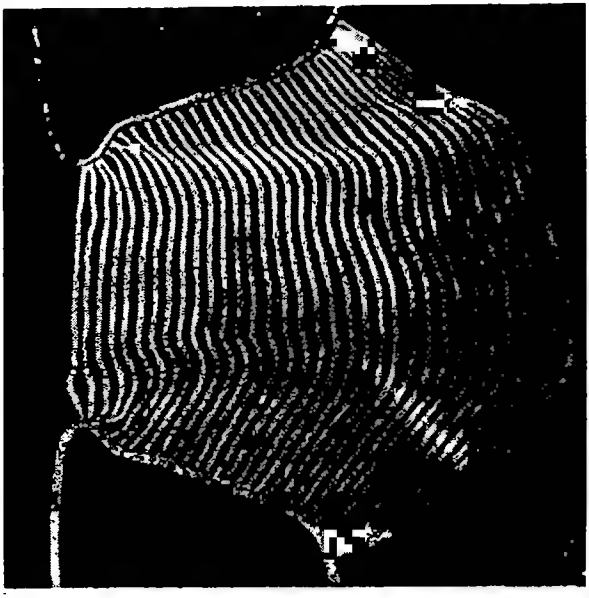


Рис. 179. Стабилизированная кварцем серия искр частотой 10 *кгц* с расходящимся потоком.

пробивает расстояние между электродами, можно видеть не только перескочившую назад искру, но также и прохождение по старому плазменному шнуру, впрочем со значительно меньшей интенсивностью.

Затем наблюдалось, что каждая вспышка появляется дважды при эксперименте со сдвигом по отношению друг к другу на $\sim 0{,}3$ *мм*.

При скорости пленки 75 *м/сек* это смещение обеих вспышек соответствует промежутку времени 4 *мксек*. Явление, наблюдавшееся в первый раз, объясняется тем, что часть поданной импульсным трансформатором

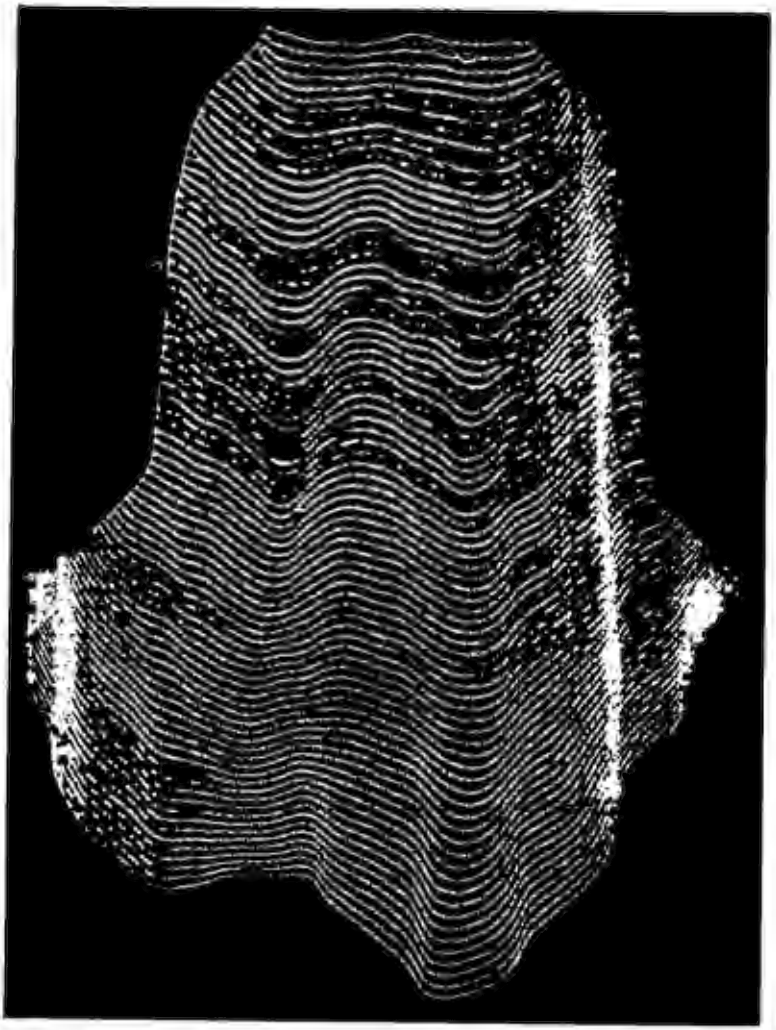


Рис. 180. Стабилизированная кварцем серия искровых разрядов частотой 20 *кгц*; поток вначале параллелен, затем расходится.

энергии протекает в старый плазменный шнур и заставляет его светиться. Второе явление можно объяснить следующим: разрядные импульсы лампы-вспышки или

тиратрона зажигания, как уже упомянуто, повышаются в импульсном трансформаторе. Необходимо, чтобы на вторичной обмотке этого трансформатора для каждого импульса сумма токов равнялась нулю, т. е. чтобы контур высокого напряжения импульсного трансформатора возбуждал колебания.

В данном случае эти колебания достигают максимума на 4 *мксек* позже, чем основной (главный) импульс. Обратный ток в состоянии вновь возбудить плазменную струю до свечения, происшедшего за 4 *мксек* до пробоя. Этот эффект может быть усилен посредством выбора особых размеров вторичного контура и может быть использован для микроанализа.

Решающее значение для объема информации снимка при вспышке имеет выбранная частота. Выше было уже показано, что при 5 000 искрах в 1 *сек* в воздухе обусловлена нижняя предельная частота. Наибольшая разумная частота наряду с нормальными для потока скоростями и их градиентами может еще зависеть от следующих факторов: продолжительности послесвечения искровой вспышки (нерезкость из-за движения объекта), диаметра искры,

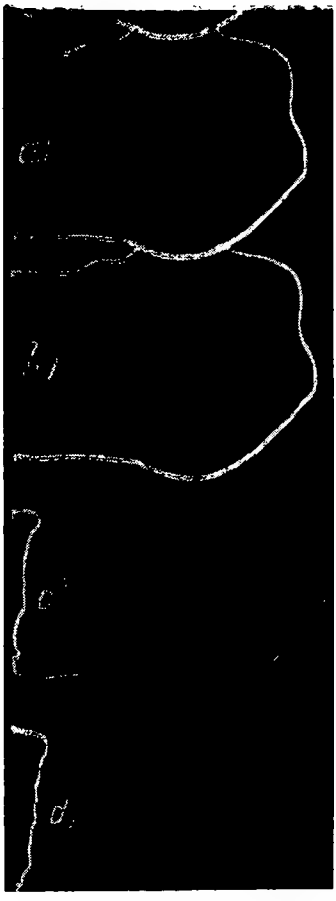


Рис. 181. Снимки камерой барабанного типа серии искровых разрядов по рис. 177. Фазы *a* и *b* показывают отклоняющуюся вправо искру, которая сопровождается более слабой второй искрой на протяжении 4 *мксек*, в то время как в фазе с искрой разряд искал новый путь в плазме, но старый путь еще слабо светится. В фазе *d* начинается новая искра.

оптической разрешающей способности и чувствительности пленки. В настоящее время на описанных установках получают 70 000 вспышек в 1 *сек.*

При особом выполнении по такому методу можно получить частоту до 140 000 вспышек в 1 *сек.*

Предел применения описанного метода получения вспышек в аэродинамике зависит во многом от термодинамических помех чувствительных потоков вследствие высокой температуры искры, от ее импульсных волн, а также от установки электродов, однако, для фотографического отпечатка путей искры достаточны такие незначительные количества энергии, протекающей через искру, что при этом не возникает существенного нагрева окружающей среды, т. е помех. При очень сильных токах, напротив, получают блуждание дуги, известное у роговых грозоразрядников на трансформаторных станциях.

L. ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТА РАЗРЯДАМИ КОНДЕНСАТОРОВ [Л. 98, 99]

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРИ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИМПУЛЬСАМИ СВЕТА

Каждое передающее устройство включает передатчик и приемник. При сигнализации импульсами света передатчиком служит искровой разрядник, работающий в воздухе или инертном газе, который питается разрядами конденсаторов и генерирует короткие импульсы света большой мощности. Приемник вследствие кратковременности импульса имеет чаще всего вакуумный фотоэлемент с последующими системами усиления.

Во всех, а в особенности оптических передающих установках принципиально возможны следующие устройства:

Передатчик	Приемник
1. Шаровое излучение	Направленная характеристика
2. Направленное излучение	Шаровая характеристика
3. Шаровое излучение	Шаровая характеристика
4. Направленное излучение	Направленная характеристика

Первый вид с небольшим ограничением может применяться для сигнализации при движении уличного транспорта, в автомобильных приборах обгонной сигнализации. В этом случае излучение только очень слабо концентрируется или лишь диафрагмируется.

Третий вид еще не нашел значительного технического применения. По четвертому виду работают импульсно-оптические измерители высоты облаков и дальности видимости, применяемые в авиационной метеорологии.

Радиусы действия этих четырех групп не сравнимы между собой, так как трудно точно определить влияние дневного света как мешающего фактора, а также фокусирующую способность каждой системы линз. В первом и третьем случаях, т. е. при шаровой направленности излучения, яркость света, излучаемого передатчиком, не играет никакой роли, а имеет значение только общее излучение в импульсе мощности; во втором и четвертом случаях существенны только яркость света и величина зеркала. Так как искровые разряды имеют высокую яркость света, они преимущественно и применяются в этих случаях.

Даже при длительной работе можно получить от 10^7 до 10^8 *сб* по сравнению с 1 000 *сб* ламп накаливания, 30 000 *сб* дуговых ламп и 100 000 *сб* ламп, наполненных инертным газом наивысшего давления.

Вместе с высокой яркостью света весь спектр имеет высокую интенсивность цвета; вся температура соответствует температуре черного тела от 50 000 до 140 000° К [Л. 98].

Одновременно с возрастанием непрерывного континуума по сравнению с селективным излучением спектральный центр тяжести излучения смещается все больше и больше к синей области спектра вплоть до ультрафиолетовой. Однако этому кажущемуся недостатку противостоит все большее возрастание яркости излучения. При рабочем давлении от 5 до 10 *ат* и токе в пике от 3 000 до 8 000 *а* с помощью разрядной системы автора [Л. 6, 99, 11, 98] можно получить максимальный импульс мощности до 40 *Мвт* в шарообразной искре при максимальном значении плотности света до $2 \cdot 10^8$ *сб* и технически допустимое среднее импульсное значение $5 \cdot 10^7$ *сб*. Подобные импульсные источники света уже нельзя выполнять с запаянными колбами ламп, так как они легко

разрушаются звуковыми волнами искры и, кроме того, происходит быстрое почернение стеклянных или кварцевых стенок ламп. В надежно работающих измерителях высоты облаков можно работать с пиком импульса $5 \cdot 10^7$ *сб*, и таким образом, при поверхности зеркала 2 000 *см*^{2} общее излучение в оптической области 10^{11} *св*. При таком режиме достигается в длительной эксплуатации следование импульсов от 5 до 20 в 1 *сек*. Соответственно этому пики света, измеряемые вторым и четвертым видами приемника (это относится как к видимому свету, так и к инфракрасным и ультрафиолетовым лучам), чрезвычайно высоки. Оставляя без внимания абсорбцию воздуха, в измерителе высоты облаков на расстоянии 1 000 *м* при яркости прожектора 10^{11} *св* можно, например, еще получить по оси пиковое значение 10^5 *лк* на облачном слое. При равных мощностях генераторов при туманной погоде с точки зрения рассеивания, пропорционального $1/\lambda^4$, инфракрасные лучи благоприятнее, чем синий свет или ультрафиолетовые лучи. Но максимальную яркость света или импульсную мощность получить в инфракрасных лучах несравненно труднее, чем в синем или ультрафиолетовом свете (закон смещения Вина). **Оказывается, что выигрыш в импульсной мощности при коротковолновом свете больше, чем потери на рассеивание, по сравнению с инфракрасными лучами.**

Максимум искр с максимальной температурой черного тела 140 000° К лежит теоретически в области весьма коротких ультрафиолетовых лучей. Но технически вследствие абсорбции газа, наполняющего искровую камеру, видимая искра величиной с горошину излучает со спектральным максимумом в среднем ультрафиолете и вторым полезным максимумом в сине-фиолетовой области спектра. Таким образом, получают возможность работать либо в области видимого спектра при использовании наивысших энергий и умеренной абсорбции, либо в ультрафиолетовой области, причем появляется значительное преимущество, а именно абсорбция средне- и коротковолнового ультрафиолета солнечного излучения слоем озона, расположенным на высоте 20—30 *км* в атмосфере. Этим слоем абсорбируются все ультрафиолетовые лучи с длиной волны ниже 310 *нм* [Л. 100], хотя в нашем обычном высотном слое содержание озона настолько мало, что в нем незаметна дополнительная

удельная абсорбция озоном. Поэтому имеется возможность в сравнительно темный день импульсно-оптически перекрывать большие дистанции лучами с длиной волны около 300 *нм*. Так как в видимой и инфракрасной областях значительны помехи вследствие излучения Солнца, несмотря на то, что Солнце с температурой поверхности около 6000° К представляет собой относительно холодное тело по сравнению с крайне высокой температурой черного тела искры, нужно считаться с сильным фоном в инфракрасной и видимой областях при непосредственном облучении фотоэлемента солнцем; однако при размещении ультрафиолетового фильтра перед фотоэлементом становится возможным значительно снизить уровень помех, но при этом при передаче на большое расстояние происходит интенсивная абсорбция ультрафиолетового излучения в воздухе [1]. Применяемые в настоящее время автомобильные приборы обгонной сигнализации, измерители высоты облаков и дальности видимости используют как компромисс синефиолетовое импульсное излучение в области максимума чувствительности цезиево-сурьмянистого фотокатода. Дальность действия мало меняется при переходе от дня к ночи. Опытным путем установлено, что ночью можно работать при расстоянии, примерно в 2 раза большем, чем днем, так как в настоящее время еще нет технически идеальных фильтров для чистого ультрафиолета, которые абсолютно подавляли бы солнечный свет. Имело бы смысл создать катоды, у которых круто возрастала бы чувствительность при волнах короче 310 *нм*.

В противоположность фотосъемке в тумане и дыме, которая вследствие рассеивания света действительно возможна только в инфракрасной области, в области передачи сигналов речь идет о том, чтобы очень нерезко видящий «глаз» приемника в достаточной степени вос-

[1] Мидлтон [Л. 101] расчетным путем доказал известное явление, что далекие объекты кажутся бледноокрашенными, частично с изменением цвета. Бледно-голубая окраска предмета на большом расстоянии имеет цвет такой же, как сильноточная искра в аргоне. Фактически наибольшую область действия импульсно-оптической передающей системы получают в том случае, если свет искры со стороны генератора не фильтруется, а со стороны приемника фотокатод нечувствителен к цветам желтому, красному и т. д. и максимум его эмиссии находится в области от синего до ультрафиолетового света.

принял свет от передатчика. При этом оказывается, что при настоящем тумане, когда нет сильной абсорбции, между близким ультрафиолетовым, который еще может воздействовать на фотокатод, и инфракрасным светом почти нет разницы. При тумане, который для глаза уже кажется белым, можно на расстоянии, равном примерно 20-кратному пределу видимости, еще обеспечить достаточную четкость передачи между генератором и приемником независимо от того, используется ли сине-фиолетовое или инфракрасное излучение. Инфракрасное излучение имеет тот недостаток, что днем оно позволяет работать лишь на значительно меньшем расстоянии, чем ночью; при сине-фиолетовом излучении расстояние перекрываемое днем, значительно больше.

В измерителях дальности видимости можно использовать большее затухание ультрафиолетовых лучей по сравнению с инфракрасными при ясной погоде, для того чтобы при большой видимости от 1 до 50 *км* получить высокую чувствительность показаний, а при малой видимости и тумане просветить импульсами даже при самом сильном затухании. Область регулирования составляет в практически выполнимых инструментах около 15 *неп.*

2 ПРОТЕКАНИЕ ВО ВРЕМЕНИ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СВЕТОВОГО СИГНАЛИЗИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА

Световой импульс генерируется конденсаторным разрядом. На рис. 182 схематически показаны некоторые малоиндуктивные устройства[1], на рис. 183 — конструктивная схема концентрической разборной импульсной лампы [Л. 54, 102, 103, 73, 74, 75, 76].

Превращение накопленной в конденсаторе энергии в свет дает наивысшую яркость света в том случае; если:

1) энергия конденсаторов в кратчайший срок приводит к образованию искры (устройств, соответствую-

[1] Чрезвычайно кратковременные искры длительностью до 0,25 *мксек*, дающие высокую яркость света, описаны Фишером [Л. 110, 111].

щих *3* и *4* по рис. 182, нужно избегать; *1* и *2* имеют самую низкую индуктивность);

2) одновременно достаточно ионизировано необходимое для образования искры пространство.

Из этого следует, что искровое сопротивление по возможности должно иметь величину апериодического гра-

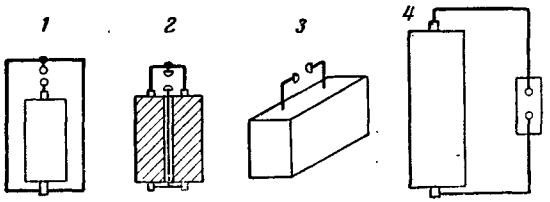


Рис. 182. Техническое применение разрядных контуров для сигнализации. Формы *1* и *2* обладают особенно малой индуктивностью и необходимы при максимальных емкостях, *3* и *4* допускаются при малых энергиях искры, при которых индуктивность может быть и более высокой.

ничного сопротивления разрядного контура, так как апериодический разряд дает возможность наиболее быстро превращать одну форму энергии в другую. Насколько выполняется это требование в промышленных устройствах, показывает следующий примерный расчет.

Дано: искровое пространство

$$V=10\ мм^3;\ C=0{,}1\ мкф;\ L=0{,}03\ мкгн;\ U=18\ кв.$$

Время затухания[1] возбужденных ионов составляет примерно

$$T=1\cdot 10^{-7}\ сек.$$

Необходимая мощность ионизации во время краткого пика эмиссии составляет

$$N_i=\frac{neU_a}{T},$$

где n — число молекул в искровом пространстве V;
e — элементарный заряд;
U_a — напряжение ионизации наполняющего газа (для аргона 15,7 *в*).

Тогда $N_i=4{,}9\cdot 10^7\ вт.$

[1] Действительно только для элементарных частиц в сжатых разрядах, а не в каналовых лучах, как при измерениях Вина.

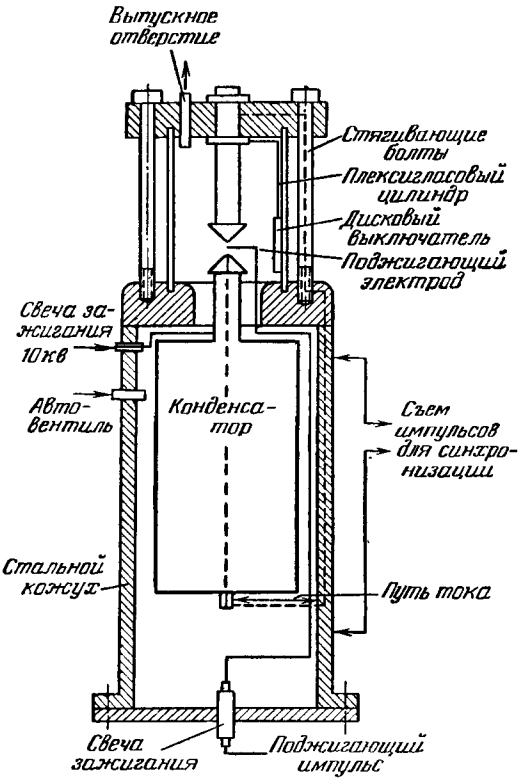


Рис. 183. Разборная лампа со встроенным конденсатором для искровых вспышек, предназначенная для опытов по импульсно-оптической передаче снимков.

Электрическая мощность $N_e = \frac{CU^2}{2t}$ потребляется в течение первого полупериода; поэтому

$$t = \pi\sqrt{LC} \quad \text{и} \quad N_e = \frac{CU^2}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Это дает $N_e = 5{,}4 \cdot 10^7$ *вт*. Как видно, в этом примере обеспечивается мощность, необходимая для ионизации. Теперь еще нужно определить, выполняется ли условие $R_F < R_{ap}$.

Апериодическое граничное сопротивление разрядного контура

$$R_{ap} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 1{,}1 \text{ ом}.$$

Приближенно искровое сопротивление

$$R_F \approx \frac{klp}{Q} = 2{,}7 \text{ ом}^*.$$

Здесь $L = 0{,}03 \cdot 10^{-6}$ *гн*;
$C = 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ *ф*;
$k = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ (эмпирически, по Биндеру);
$l = 0{,}8$ *см* (длина искры);
$p = 8$ *ат* (давление в разрядном пространстве);
$CU = Q = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ *а·сек* (количество электричества, протекающее через искровой канал).

Искровое сопротивление R_F также достаточно велико. Колебательный процесс уже протекает слабо апериодически. Приведенный здесь примерный расчет из-за

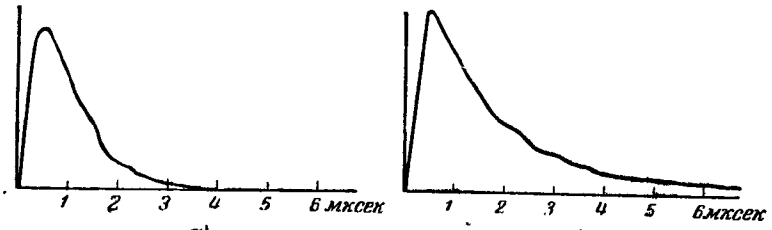


Рис. 184. Осциллограммы при передаче снимков в синей области спектра при емкости разряда *а* — 0,04 *мкф*, *b* — 0,2 *мкф* и одинаковом масштабе по амплитуде. Напряжение 9 *кв*, наполняющий газ аргон +50% водорода.

Эти осциллограммы показывают, что, несмотря на то, что в случае *b* энергия больше в 5 раз, чем в случае *а*, амплитуды импульсов одинаковы.

грубых оценок времени ионизации и искровой постоянной не позволяет делать выводы, идущие дальше того, что приведенные в примере значения достаточно правильны.

На рис. 184 показаны две осциллограммы изменения света, показывающие влияние емкости (рис. 184,*а* при

---

* Искровая формула Теплера дает здесь не точное значение, но достаточное для приближенного расчета. Более точные значения находятся по Ромпе — Вайцелю [Л. 53, 57].

емкости 0,04 *мкф*, 184,*b* — при 0,2 *мкф*, зарядном напряжении 12 *кв*, при давлении наполняющего газа 4 *ат*).

Удобный для усилителя частотный интервал сигналов можно легко установить по схеме на рис. 185, на которой приемный фотоэлемент включен вместо антенны радиоприемника.

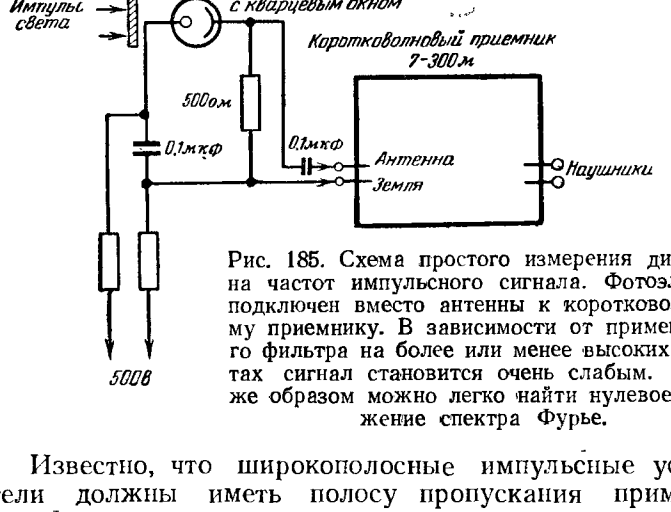


Рис. 185. Схема простого измерения диапазона частот импульсного сигнала. Фотоэлемент подключен вместо антенны к коротковолновому приемнику. В зависимости от применяемого фильтра на более или менее высоких частотах сигнал становится очень слабым. Таким же образом можно легко найти нулевое положение спектра Фурье.

Известно, что широкополосные импульсные усилители должны иметь полосу пропускания примерно $B = \frac{1}{t}$. При длительности импульса в соответствии с осциллограммой $t = 1$ *мксек*, целесообразная область частот 0 — 1 *Мгц*. Для контроля частоты излучаемых передатчиком импульсов света целесообразно использовать измерительную схему по рис. 185. На входе измерительного приемника вместо антенны помещают фотоэлемент с чувствительностью, калиброванной в микровольтах, на который должен попадать импульс света. Получаемая кривая частот непосредственно дает ширину полос пропускания приемника. Они лежат для света искры всегда в пределах 0 — 10 000 *кгц*, причем для уменьшения помех светом низкой частоты нижняя граница при малых потерях должна начинаться от 50 — 100 *кгц*. Очень мощные импульсные лампы имеют сильное излучение частотой только до 1 000 *кгц*, более слабые с очень крутым возрастанием — до 5 000 *кгц*.

Далее, при более высоких частотах, лежащих между 2 и 4 *Мгц*, находят отчетливый минимум или нулевое значение соответственно первому минимуму Фурье. Ширина полосы пропускания приемника должна быть ограничена, не доходя этой частоты, так как все более высокие частоты дают обратную полярность импульса. Еще более высокие частоты, расположенные за вторым минимумом, который часто также может иметь место, имеют полярность такую же, как и главный импульс, но их интенсивность очень мала [Л. 104].

3. РАСЧЕТ ПЕРЕДАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

На основе изложенных положений ниже следует расчет характеристик установки для передачи импульсов света для двух случаев. В табл. 12 прежде всего дано сопоставление оптических требований, которые могут быть поставлены перед двумя передающими установками.

Таблица 12

Оптические требования к двум устройствам для передачи световых импульсов [Л. 98]

	Случай 1	Случай 2
Дальность действия	10 *км*	20 *км*
Диаметр зеркала со стороны передатчика	До 50 *см*	До 1 *м*
Угол рассеивания передатчика	Около 2—3°	Около 2—3°
Излучение передатчика	Видимое	Невидимое
Точность подачи светового импульса	$1 \cdot 10^{-6}$ *сек*	$1 \cdot 10^{-6}$ *сек*
Минимальная пауза между импульсами	$3 \cdot 10^{-3}$ *сек*	$3 \cdot 10^{-3}$ *сек*
Максимальное число импульсов в секунду	12	12
Угол приема приемника	90°	90°
Выходное напряжение приемника	150 *в*	150 *в*
Продолжительность выходного импульса	$3 \cdot 10^{-4}$ *сек*	$3 \cdot 10^{-4}$ *сек*

Для обеих установок сначала рассчитывают дробовой эффект фотоэлемента с катодом Cs—Sb и фильтром $UG5_{2\ мм}$ для различной интенсивности солнечного облучения (100, 1 000 и 10 000 *лк*). Определяется абсолютная спектральная чувствительность применяемого фотоэлемента. Затем для расчета принимают распределение

энергии по спектру солнечного излучения по Абботу [Л. 58] для уровня моря при массе воздуха $M=1$ *.

Обозначим:

E_s — освещенность от солнца, *лк*; или 10^{-4}, *лм/см²*;

$B_{s\lambda}$ — спектральная интенсивность солнечного облучения, *вт/см²·нм*;

d_λ — интенсивность облучения для области длин волн, *вт/см²*;

D_λ — проницаемость фильтра для длины волны λ;

S_λ — абсолютная спектральная чувствительность элемента, *а/вт*;

S — поверхность фотоэлемента, *см²*;

M_λ — фотометрический эквивалент излучения, *лм/вт*, для длины волны λ;

I_s — ток фотоэлемента при солнечном облучении.

Тогда

$$I_s = S\,\Sigma B_{s\lambda} D_\lambda S_\lambda,\ a$$

и световой поток от солнца

$$\Phi_s = S\,\Sigma B_{s\lambda} M_\lambda D_\lambda,\ лм$$

или

$$E_s = 10^4 \Sigma B_{s\lambda} M_\lambda D_\lambda,\ лк.$$

Делением тока фотоэлемента на световой поток или интенсивность излучения получим

$$\frac{I_s}{\Phi_s} = \frac{\Sigma B_{s\lambda} D_\lambda S_\lambda}{\Sigma B_{s\lambda} M_\lambda D_\lambda},\ а/лм$$

или

$$\frac{I_s}{E_s} = 10^4\,\frac{S\,\Sigma B_{s\lambda} D_\lambda S_\lambda}{\Sigma B_{s\lambda} M_\lambda},\ а/лк.$$

Расчетная чувствительность цезиево-сурьмянистого фотоэлемента с фильтром $UG5_{2\ мм}$

$$\frac{I_s}{\Phi_s} = 75\cdot 10^{-6},\ а/лм \text{ или } 75\cdot 10^{-10},\ а/лк\cdot см^2.$$

---

* Масса воздуха обозначается $M=1$ для уровня моря при давлении 760 *мм рт. ст.*

Чувствительность фотоэлемента в амперах на ватт энергии солнечного излучения в области проводимости фильтра $UG5_{2\ мм}$ от 290 до 420 *ммк*

$$\frac{I_s}{W_s}=1{,}2\cdot10^{-2},\ a/вт.$$

Дробой эффект «солнечного фототока» по Шоттки составляет:

$$\Delta I_s^{-2}=\frac{I_s e}{T};\quad \Delta Q_s^{-2}=I_s eT,$$

где $\Delta\bar{I}_s$ — средний ток помех;

$\Delta\bar{Q}_s$ — средний импульс помех;

T — время сигнала; в данном случае $T=5\cdot10^{-7}$ *сек*;

e — заряд электрона; $e=1{,}6\cdot10^{-19}$ *а·сек*;

I_s — «фототок при солнечном облучении».

В табл. 13 показан дробовой эффект при одном ($S=6$ *см*^{2}) и трех параллельно включенных фотоэлементах ($S=18$ *см*^{2}).

Таблица 13

Ток помех цезиево-сурьмянистого фотоэлемента при различной интенсивности солнечного излучения

Интенсивность солнечного излучения, *лк*	100	1 000	10 000	
Солнечный фототок, *а* . .	$4{,}5\cdot10^{-5}$	$4{,}5\cdot10^{-5}$	$4{,}5\cdot10^{-4}$	один фотоэлемент с $S=6$ *см*^{2}
Ток помех, *а*	$1{,}2\cdot10^{-9}$	$3{,}8\cdot10^{-9}$	$1{,}2\cdot10^{-8}$	
Импульс помех, *а·сек* .	$6\cdot10^{-16}$	$1{,}9\cdot10^{-15}$	$6\cdot10^{-15}$	
„Солнечный фототок", *а* . .	$13{,}5\cdot10^{-6}$	$13{,}5\cdot10^{-5}$	$13{,}5\cdot10^{-4}$	три фотоэлемента с $S=18$ *см*^{2}
Ток помех, *а* .	$2{,}1\cdot10^{-9}$	$6{,}6\cdot10^{-9}$	$2{,}1\cdot10^{-8}$	
Импульс помех, *а·сек* .	$1{,}04\cdot10^{-15}$	$3{,}28\cdot10^{-15}$	$1{,}04\cdot10^{-14}$	

Так как излучаемые лампой импульсы короче, чем требуются на выходе приемника, их удлиняют и одновременно выравнивают с помощью мультивибраторной схемы. Для надежного включения необходимо напряжение 200 *мв*. Таким образом, очень слабый сигнал, поступающий от фотоэлемента, должен быть еще усилен до

этого значения, для того чтобы произвести включение. Этот наиболее слабый сигнал должен быть в e раз больше напряжения шумов «солнечного фототока», которым можно пренебречь по сравнению с шумами остальной схемы входа приемника. При расчетах согласования фотоэлемента с входом приемника можно, как приведено выше, считать полосу пропускания 1 *Мгц*. При емкости входа 10 *пф*, расположенной параллельно рабочему сопротивлению, пограничное значение величины последнего составляет 20 *ком*. Для того чтобы можно было получить от фотоэлемента как можно большее абсолютное напряжение, рекомендуется несколько превысить это значение; 50 *ком* будут желательным компромиссом. На этом сопротивлении ранее рассчитанные спонтанные колебания солнечного фототока до максимального значения $2{,}1 \cdot 10^{-8}$ *а* вызывают напряжение помех до 1 *мв*. Увеличенное в e раз, это напряжение, составляющее 2,7 *мв*, должно быть усилено до срабатывания генератора релаксационных колебаний так, чтобы наименьший коэффициент усиления напряжения составил 100 *.

Интенсивность излучения точечного источника света, находящегося в фокусе идеального параболического рефлектора, на расстоянии r при предположении, что расстояние между генератором и приемником больше r и среда не абсорбирует,

$$B_r = \frac{B_0 S_R R (1 - K)}{4\pi r^2}, \ вт/см^2,$$

где B_0 — яркость излучения в направлении, перпендикулярном поверхности искры во всей спектральной области;

B_r — интенсивность облучения на расстоянии r;

S_R — поверхность рефлектора;

R — отражательная способность рефлектора;

K — коэффициент затемнения.

---

* Среднее напряжение помех при комнатной температуре и $\Delta f = 1$ *Мгц* на 50 *ком* составляет $U = 30$ *мв*. Видно, что им можно пренебречь по сравнению с напряжением от солнечного фототока, составляющим до 1 000 *мв*. Это справедливо также для помех электронному току первой лампы, у которой максимальное эквивалентное сопротивление помехам составляет 10 *ком*, т. е. меньше, чем рабочее сопротивление фотоэлемента. Поэтому применение электронных умножителей бессмысленно, так как шумы фотокатода также будут усиливаться.

По измерениям Торварта [Л. 55] и Глазера [Л. 56] при используемом в этих работах искровом источнике света B_0 было равно $6 \cdot 10^5$ *вт/см*^{2}. Для рефлектора диаметром 35 *см* и $R=0{,}8$ (коэффициент затемнения 20%) излучаемая мощность $L=4 \cdot 10^8$ *вт* (потери при отражении можно оставить без внимания).

При наличии рассеивающей среды в формулу входит еще коэффициент абсорбции ε. Тогда

$$B_r = e^{-\varepsilon r} \frac{L}{4\pi r^2}, \ вт/см^2.$$

ε для средней длины волны 360 *нм* определяется по кривым Коха [Л. 100] и Клумба [Л. 3]. В табл. 14 показаны значения ε и соответствующая проницаемость воздуха при различной оптической видимости.

Таблица 14

Коэффициент абсорбции воздуха при $\lambda = 360$ *нм*

Оптическая видимость, *км*	Проницаемость воздуха для 1 *км*	Коэффициент абсорбции ε для 1 *км*	Оптическая видимость, *км*	Проницаемость воздуха для 1 *км*	Коэффициент абсорбции ε для 1 *км*
40	0,82	0,19	15	0,60	0,51
30	0,78	0,25	10	0,44	0,82
20	0,69	0,37	5	0,18	1,72

Излучение рефлектора на расстоянии r попадает на цезиево-сурьмянистый фотоэлемент, чувствительность которого для лучей аргоновой лампы рассчитывается так же, как и для солнечного света.

Для освещения промышленного рефлектора диаметром 35 *см* нужно иметь искру длиной 6 — 8 *мм* в направлении оси рефлектора [Л. 6]. Вследствие большего рассеивания этого рефлектора по сравнению с принятым в расчете идеальным случаем расчет дает больший радиус действия, чем практически может быть реализован. Позднее проведенные опыты показали, что расчетный радиус действия в 1,3 раза больше практически достижимого.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 186 показана экспериментальная измерительная схема для определения фотоэлементом [Л. 6] яркости импульсной лампы. Из-за высокой импульсной осве-

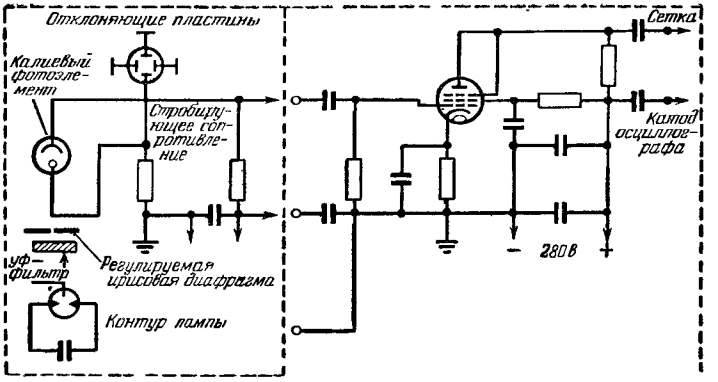


Рис. 186. Измерительная схема для определения плотности света фотоэлементом и осциллографом. Электронный луч подсвечивают стробирующим усилителем, для того чтобы отчетливо выделить амплитуду импульса. В фотоэлементе могут быть использованы только щелочные катоды, проводимость слоя которых выше или равна цезиево-сурьмянистым катодам, напыленным на металл.

щенности применяют простые, с низкой, но постоянной чувствительностью калиевые фотоэлементы, которые выполнены как фотоэлементы с высоким выходным напряжением и хорошим вакуумом. При непосредственном осциллографическом определении амплитуды сначала с помощью регулируемой ирисовой диафрагмы проверяют линейный закон, а затем сравнивают поверхность диафрагмы и амплитуду на осциллографе. Правая часть схемы—усилитель селектирующих импульсов. Проверка линейности, т. е. работы при устранении пространственного заряда фотоэлемента, производится изменением расстояния или диафрагмы.

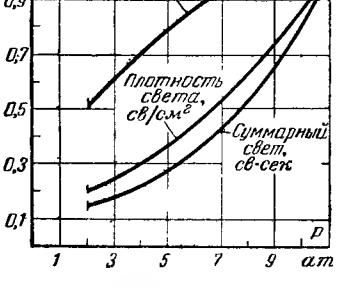


Рис. 187. Амплитудная плотность света в зависимости от давления. Дополнительно приведена энергия разряда. Расстояние между электродами при всех измерениях оставалось постоянным. Наполняющий газ — криптон.

Результаты измерений можно считать достоверными только до тех пор, пока импульсное напряжение на

выходе фотоэлемента следует закону квадрата расстояния от импульсной лампы. В фотоэлементе наблюдаются импульсные токи заряда до 0,1 *а*, и поэтому по закону пространственного заряда Лэнгмюра — Шоттки применяется ускоряющее напряжение до 2 *кв* в зависимости от формы и конструкции фотоэлемента. Такой порядок

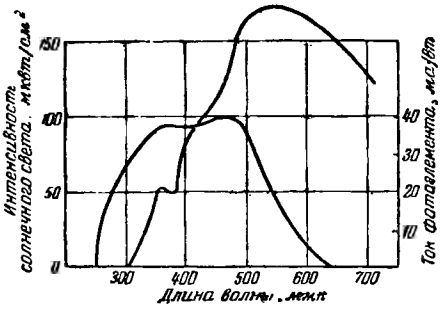


Рис. 188. Сравнение максимумов абсолютной чувствительности фотоэлементов и солнечного облучения.
Интенсивность солнечного излучения (*мквт/см*²) по Абботу на поверхности земли при массе воздуха $M=1$ на высоте от уровня моря $h=0$. Абсолютная спектральная чувствительность цезиево-сурьмянистого уфолевого фотоэлемента.

включения легко контролируется синим светом или отфильтрованным по спектру светом ртутной лампы.

На рис. 187 показана зависимость яркости от давления наполняющего газа и энергии в каждой вспышке.

На рис. 188 показаны интенсивность облучения, попадающего на фотоэлемент, и одновременно кривая спектральной чувствительности, которую имеют обычные цезиево-сурьмянистые фотоэлементы промышленных приемников световых вспышек.

Для длин волн 280, 320, 360 *нм* Кох [Л. 100] и Клумб [Л. 61] провели измерения прозрачности атмосферы в зависимости от оптической дальности видимости. Эти данные позволяют рассчитать необходимую для преодоления желаемого расстояния мощность излучения для любых условий видимости, если известна чувствительность приемника. Из них же вытекает, что речь не может

идти об излучении с длиной волны менее 300 *нм* при больших расстояниях из-за больших абсорбционных потерь.

На рис. 189 показана абсолютная чувствительность цезиевых и цезиево-сурьмянистых катодов и видно значительное превышение кривой *2* над кривой *1*. Кривая *1* возрастает в более удаленной инфракрасной области спектра.

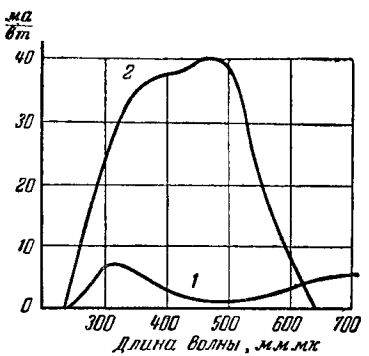


Рис. 189. Абсолютная чувствительность фотоэлементов с цезиево-окисносеребряным *1* (Cs—AgO) и цезиево-сурьмянистым *2* (Cs—Sb) катодами.

Чувствительность фотоэлементов и дробовой эффект. Так как приемники световых вспышек различаются по фотоэлементам, интенсивность постоянного света или медленные колебания ее не играют никакой роли. Однако постоянный ток, протекающий в фотоэлементе вследствие мощного излучения постоянного света (солнце или рассеянный свет облаков), создает рассчитанные выше спонтанные колебания. Их величина

$$\overline{I}_s^2 = F^2 2eI_f\Delta f,$$

где F^2 — коэффициент насыщения фотоэлемента; при насыщении $F^2=1$;

e — элементарный заряд;

I_f — ток фотоэлемента;

Δf — ширина полосы пропускания.

Эти колебания при известных обстоятельствах могут быть больше, чем амплитуда сигнала. Коэффициент насыщения F^2 в формуле означает, что при наличии пространственного заряда наступает уменьшение помех. Но так как краткий сигнальный импульс вязнет в трясине пространственного заряда, так же как и спонтанные колебания, всегда необходимо работать в насыщенном режиме ($F^2=1$). Квадратичная зависимость между $\overline{I}_s$ и I_f означает, что увеличение поверхности фотоэлементов

также приводит к повышению разницы амплитуд сигнал — шум, так как амплитуда сигнала изменяется в линейной зависимости от тока фотоэлемента. Зависимость от ширины полосы Δf говорит, наконец, о том, что резонансный усилитель при малом Δf имеет низкие собственные шумы [1].

Наконец, спонтанные колебания можно сделать малыми путем уменьшения I_f, т. е. устранение облучений фотоэлемента постоянным светом. Для этого необходимо сужением оптической полосы пропускания уменьшить количество падающего постоянного света, т. е. чтобы могла проходить только часть спектра, содержащая максимум генерируемого передатчиком излучения. Это можно сделать при помощи фильтра или соответствующим регулированием спектральной чувствительности фотокатода. В дальнейшем нужно работать в той области спектра, в которой меньше всего излучений, создающих помехи. Спектр солнечного света в соответствии с рис. 188 показывает ниже 450 *нм* постепенное снижение интенсивности коротковолнового излучения вследствие поглощения в высоких слоях земной атмосферы. Нужно обеспечить, чтобы уменьшение ультрафиолетового излучения в действительности происходило еще позже и круче, так как с непосредственным солнечным излучением складывается еще рассеянный свет, который вследствие сильного рассеивания ультрафиолетовых лучей имеет большую величину, и по Коху [Л. 100] при длине волны менее 310 *нм* поглощение может доходить до 100% излучения. По этой причине (не принимая во внимание абсорбцию) была бы желательна возможно меньшая длина волны (менее 300 *нм*).

На рис. 190 показана кривая проницаемости некоторых фильтров. Совместно с фотоэлементом, соответствующим кривой *2* из рис. 189, фильтр по кривой *3* является наиболее приемлемым для технических целей,

---

[1] Если при дополнительном ускоряющем напряжении фотоэлемента или дополнительном катодном токе не достигается насыщение, нужно фильтрацией или диафрагмированием уменьшать общий свет, т. е. нарушающий дневной свет и сигнальный свет, чтобы обеспечить насыщение. См. также [Л. 105]. Резонансный усилитель не рекомендуется для приема постоянных импульсов, так как его переходный процесс предполагает наличие одной определенной частоты.

так как он пропускает в достаточной степени полезный свет, ослабляет дневной свет и позволяет использовать максимум чувствительности фотоэлемента. Проницаемость фильтра UG5 в области ультрафиолетовых лучей возрастает слишком рано, что, однако, может корригироваться добавкой жидкостного фильтра. Для этого оказались особенно пригодными водные растворы никелевых солей, как например, $NiSO_4$ (по Мейеру — Зайтцу [Л. 62], см. *1* на рис. 190) или $NiCl_2$ (Клумб, [Л. 60]). Если нельзя применить жидкостный фильтр (колебания температуры, тяжелые условия работы), приходится обходиться одним фильтром UG5. В то же время фильтр UG11, разработанный Шоттом, представляет уже шаг вперед в этом направлении.

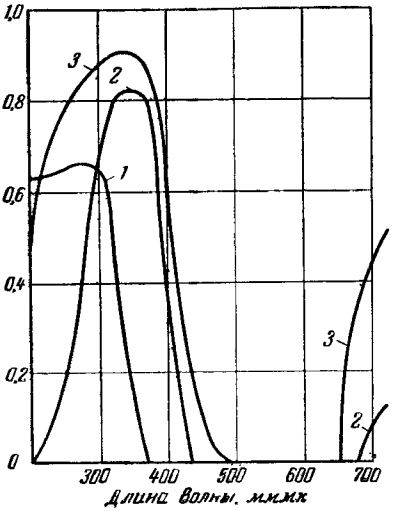


Рис. 190. Спектральная проводимость некоторых светофильтров, применяемых для защиты фотокатодов при интенсивном облучении солнцем.

1 — $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ (492 *г* на 1 *л* воды; толщина слоя 20 *мм*); *2* — Шотт UG 11 (2); *3* — Шотт UG 5 (2).

Для охвата расчетом всех областей спектра, пригодных для передачи, требуется знание спектрального пикового излучения света искры в каждой области длин волн $\Delta\lambda$.

Табл. 15 показывает результаты измерений излучения маленького импульсного сигнализатора с ксеноновой лампой при разряде емкости 0,01 *мкф*. Измерение таких пиков излучения затруднено. Импульсы света подают на входную щель монохроматора. К воспринимающей щели подключен вакуумный фотоэлемент с проводящим ультрафиолетовые лучи стеклом, сигнал которого усиливается широкополосным усилителем до необходимой амплитуды и затем фиксируется осциллографом. Монохроматор каждый раз настраивается на заданное $\Delta\lambda$,

так же как и пленка в съемочной камере. Полученное значение амплитуды нужно корригировать расчетным путем по дисперсии монохроматора и кривой чувствительности фотокатода ко всем измеряемым длинам волн. Торвартом [Л. 55] использовалась опытная уста-

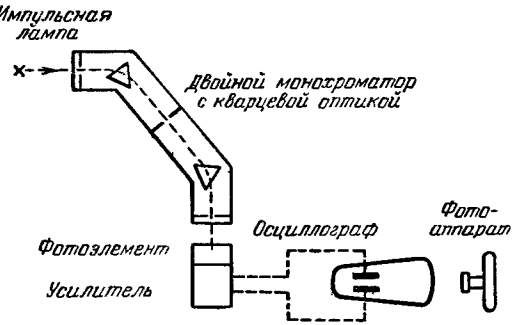


Рис. 191. Измерительная схема Торварта для определения распределения спектральной интенсивности амплитуды импульса.

новка, показанная на рис. 191. Может быть также применен спектрограф с вращающимся зеркалом [Л. 106].

Табл. 15 в последнем столбце показывает излучаемую пиковую мощность в каждой области длин волн в возможном диапазоне приема цезиевого вакуумного фотоэлемента (для того чтобы охватить также и инфракрасное излучение, используют цезиево-окисносеребряный катод).

Затем получают импульсные спектры, которые представляют собой пики мощности в каждой спектральной области. Они представлены на рис. 192 для аргоновой импульсной лампы при низком давлении наполняющего газа (около 2 *ат*) и на рис. 193 для ксеноновой лампы фирмы Osram с высоким давлением наполняющего газа (HBO 321).

На рис. 194, 195, 196 показаны расчетные, частично хорошо подтвержденные экспериментально кривые дальности действия, причем в качестве параметров приняты солнечное излучение в месте приема, диаметр зеркала и поверхность фотоэлемента. Из этих кривых и расчетов получается следующая чувствительность S_A цезиево-сурьмянистого элемента с фильтром $UG5_2$: для

Таблица 15

Спектральное измерение амплитудной мощности импульса ксеноновой лампы (Osram HBO 321) при 10 *нф* и 0,5 *мкгн*

Средняя длина волны, *нм*	Область проводимости $\Delta\lambda$, *нм*	Относительная спектральная интенсивность излучения $\overline{B}$ для $\Delta\lambda=1$ *нм*	Абсолютная чувствительность фотоэлемента s, $a\cdot10^{-3}$ $\frac{a}{вт/см^2}$	Относительный спектральный ток фотоэлемента $i=\overline{B}S\Delta\lambda$	Абсолютная спектральная интенсивность излучения на расстоянии 1 *м* при $\Delta\lambda=1$ *нм* $B=b\overline{B}$, *мквт/см²*	Произведение абсолютной интенсивности излучения на область длины волн $\Delta\lambda$ $B\,\Delta\lambda$, *мквт/см²*	Спектральная мощность лампы N, *вт*
1 138	150	11	0,13	0,21	165	24 700	
1 000	117	11	1,24	1,60	165	19 400	11 600
900	97	10	2,82	2,62	150	14 600	Инфракрасное
807	80	13	3,11	3,25	195	15 600	
735	67	18	2,65	3,20	270	18 000	
675	55	20,5	2,22	2,48	310	17 000	
625	45	25	1,92	2,11	375	16 800	
580	37	32	1,41	1,59	480	17 800	
547	32	45	0,94	1,30	675	21 600	
517	29	58	0,94	1,36	870	25 200	36 000
490	25	94	0,90	1,69	1 470	35 400	Видимое
466	22	116	0,95	1,97	1 740	38 300	
445	19,5	123	0,98	2,23	1 840	36 000	
428	16	132	1,30	2,54	1 980	31 600	
413	14,5	116	1,60	2,40	1 740	25 200	
399	13	104	2,00	2,58	1 560	20 300	
386	12	99	2,80	2,90	1 480	17 800	
375	10	97	3,40	3,30	1 460	15 000	
365	10	87	4,27	3,68	1 300	13 000	13 800
355	9	88	5,20	4,10	1 320	12 000	Ультрафиолетовое—А
347	8	84,5	5,65	3,76	1 270	10 000	
339	8	71	6,10	3,38	1 060	8 500	
331	8	62,5	6,20	3,05	935	7 500	
324	7	59,5	6,00	2,48	890	6 200	
317	6	87	5,20	2,07	1 000	6 000	
311	5,5	63	5,60	1,90	950	5 200	
306	5,5	60	5,80	1,90	900	5 000	
300	5,5	49	6,90	1,82	735	4 000	
295	5,5	43	7,05	1,65	645	3 500	
290	5	44	7,10	1,54	660	3 300	
285	4	51	7,08	1,47	765	3 100	
281	4	48,5	7,08	1,35	730	2 900	

Продолжение табл. 15

Средняя длина волны, *нм*	Область проводимости $\Delta\lambda$, *нм*	Относительная спектральная интенсивность излучения $\overline{B}$ для $\Delta\lambda=1$ *нм*	Абсолютная чувствительность фотоэлемента s, $a\cdot10^{-3}$ / *вт/см²*	Относительный спектральный ток фотоэлемента $i=\overline{B}S\Delta\lambda$	Абсолютная спектральная интенсивность излучения на расстоянии 1 *м* при $\Delta\lambda=1$ *нм* $B=b\overline{B}$, *мквт/см²*	Произведение абсолютной интенсивности излучения на область длины волн $\Delta\lambda$ $B\,\Delta\lambda$, *мквт/см²*	Спектральная мощность лампы N, *вт*
277	4	52	6,95	1,42	780	3 100	4 250
273	4	45	6,85	1,23	675	2 700	Ультрафиолетовое—B
269	4	38	6,45	0,97	570	2 300	
265	4	38	5,60	0,84	570	2 300	
261	3,5	41,5	4,40	0,63	625	2 200	
258	3,5	45	4,20	0,65	675	2 400	
254	3,5	56	3,70	0,72	840	2 900	
251	3,5	57	3,45	0,68	855	3 000	
248	3	91	3,20	0,87	1 370	4 100	
245	3	110	3,05	1,00	1 660	5 000	
242	3	177	2,90	1,52	2 660	8 000	
239	2,5	240	2,80	1,70	3 600	9 000	
236,5	2,5	130	2,50	0,91	1 960	5 000	7 200
234	2,5	103	2,50	0,69	1 550	4 000	Ультрафиолетовое—C
231,5	2	140	2,50	0,83	2 100	4 200	
229,5	2	200	2,50	1,04	3 000	6 000	
227,5	2	170	2,50	0,85	2 550	5 000	
225,5	2	126	2,50	0,60	1 900	3 800	
224	1,5	114	2,50	0,40	1 720	2 500	
				91,0		578 *мвт/см²*	72 850 *вт*

(Предельная достижимая мощность излучения увеличивается в 10 раз, если переходят к максимальной величине разрядного корпуса и 30-кратной энергии разряда. Дальнейшее увеличение приводит к колеблющимся разрядам и не дает никакого увеличения амплитуды излучения.)

аргоновой лампы с кварцевой колбой и $UG5_2$ $S_A = 48 \cdot 10^{-3}$, *а/вт*; для аргоновой лампы с кварцевой колбой без фильтра $S_A = 56 \cdot 10^{-3}$, *а/вт*.

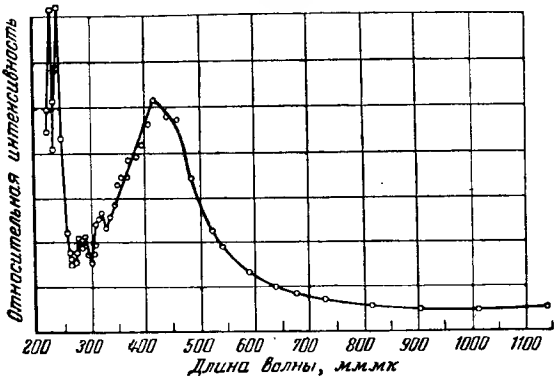


Рис. 192. Спектральное распределение амплитуд искрового разряда в аргоне по рис. 191.

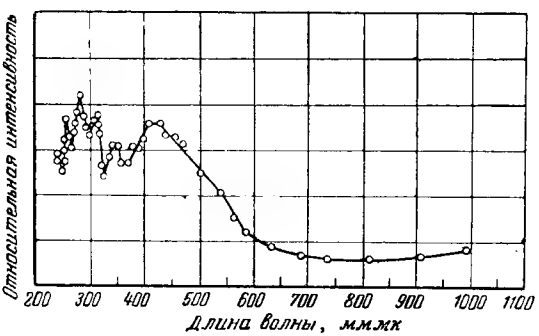


Рис. 193. Спектральное распределение амплитуд искрового разряда в ксеноне по рис. 191.

Для сигнального импульса Q_L на входе приемника мы получим:

$$Q_L = B_r S_A S T, \; а \cdot сек,$$

где B_r — интенсивность излучения аргоновой лампы, *вт/см²*;

S_A — чувствительность фотоэлемента, *а/вт*;

S — поверхность фотоэлемента, *см²*;

T — время импульса, *сек*.

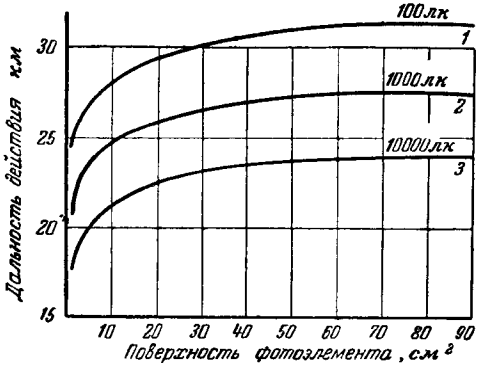


Рис. 194. Дальность действия импульсного светового сигнала при дальности видимости 30 *км* в зависимости от поверхности фотокатода (Cs—Sb) при диаметре рефлектора 50 *см*.

1 — кривая при солнечном облучении 100 *лк*; *2* — кривая при солнечном облучении 1 000 *лк*; *3* — кривая при солнечном облучении 10 000 *лк*.

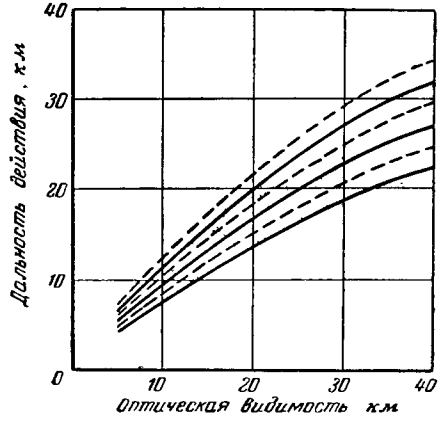


Рис. 195. Дальность действия импульсного светового сигнала при различной интенсивности солнечного облучения и оптической дальности видимости; диаметр рефлектора 50 *см*. По три кривых для фотоэлементов с поверхностью катодов 6 и 18 *см*² при облучении солнечными лучами 10^2, 10^3 и 10^4 *лк*.

Для предельной дальности импульс должен быть в e раз больше импульса помех $\sqrt{\Delta Q_s^2}$:

$$Q_L = e\sqrt{\Delta Q_s^2}.$$

Так как расчет показывает, что разница в предельной дальности действия с фильтром или без него очень мала (при фильтре на приемнике $UG5_{2\ мм}$ она составляет

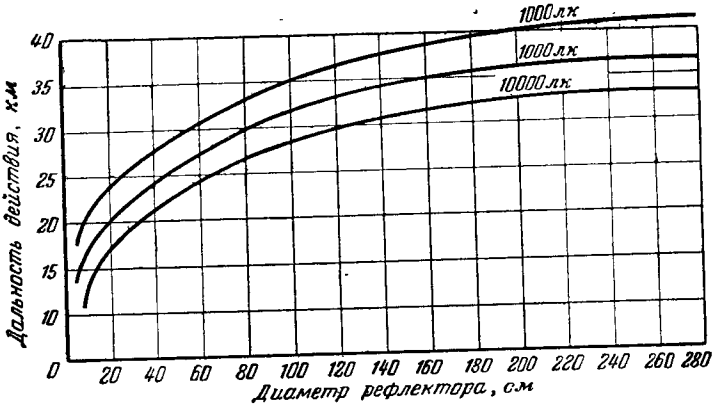


Рис. 196. Дальность действия импульсного светового сигнала при постоянной оптической видимости 30 *км* цезиево-сурьмянистого катода в зависимости от диаметра рефлектора передатчика (три кривые для солнечных лучей 10^2, 10^3 и 10^4 *лк*).

10%), все расчеты выполняют для фильтрованного излучения. Имеется следующая окончательная формула для предельной дальности действия с одним фотоэлементом ($S=6\ см^2$):

$$r^2 e^{\sigma r} = \frac{1{,}7 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{\Delta Q_s^2}}.$$

На рис. 194 — 196 даны кривые теоретической дальности действия с предполагаемой яркостью искры в зависимости от оптической дальности видимости, поверхности катода фотоэлемента, диаметра зеркала и мешающего освещения дневного света.

В практических результатах следует ожидать сильного отклонения от расчетных кривых, так как яркость непостоянна по всему сечению искры, а также ту вели-

чину диаметра искры, которая требовалась бы для отражения от промышленных рефлекторов диаметром сверх 60 *см* с высокой яркостью, физически нельзя реализовать. Очень точно отшлифованное параболическое зеркало может быть освещено точечной искрой. Однако часто высокая стоимость изготовления не дает возможности это осуществить. Максимальный диаметр рефлектора в измерителях высоты облаков около 60 *см*.

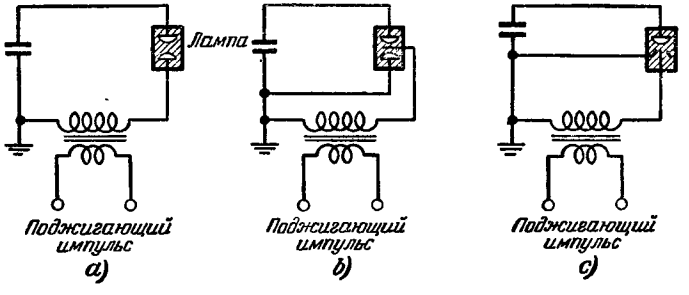


Рис. 197. Три простые рабочие схемы для генерирования управляемых световых импульсов.

Схема *а* применима только для краткой или как можно меньшей дальности действия, например в лаборатории; *b* — очень простая в изготовлении, но дает малую длительную прочность; *c* — дает хороший результат.

Обычные рабочие схемы для управления искрами для подобных прожекторов представлены на рис. 197. Непосредственное последовательное зажигание, соответствующее рис. 197,*а*, нельзя принимать во внимание, так как контур становится высокоиндуктивным. При трехэлектродных искровых разрядниках схему по рис. 197,*b* выбирают при низких требованиях к точности момента зажигания, а схему по рис. 197,*c* — для высокой точности поджигания. На рис. 198 показана схема, употребляемая при малых энергиях импульсов, которая применяется, например, в автомобильных аппаратах обгонной сигнализации, причем представленный здесь тиратрон можно заменить контактом Вагнеровского молоточка. Энергия конденсатора C_1 должна превосходить энергию конденсатора C_2 настолько, чтобы он заряжался напряжением пробоя включенного сигнального искрового разрядника. Включенный между ними импульсный трансформатор должен быть изготовлен из железа

с низкими гистерезисными потерями, для того чтобы экономично получать импульсы энергии. Форма кривой за пиком импульса в противоположность фотографическому применению осветительных искр не представляет интереса, и поэтому допускается любая форма колебаний.

На рис. 199 показана дополнительно к схемам на рис. 197,*b* и *c* область работы, выбираемая для трех-

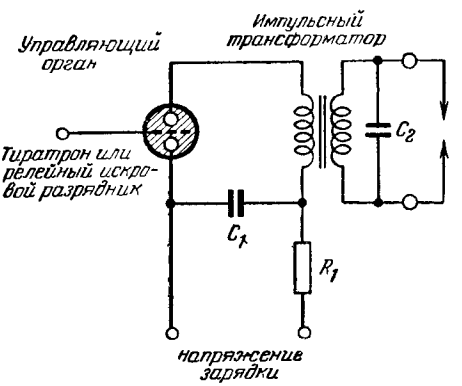


Рис. 198. Генерирование импульсов трансформированным разрядом конденсаторов. Преимущество этой схемы заключается в том, что суммарный ток во вторичном контуре импульсного трансформатора равен нулю и не происходит связанной с направлением тока передачи материала в искровом разряднике; долгий срок службы электродов.

электродного поджигаемого разрядника. Между значением напряжения самостоятельного пробоя и пониженным значением, при котором ни при каких обстоятельствах, даже при очень мощной поджигающей искре, не происходит пробоя, находится рабочая область, в пределах которой работают, принимая во внимание колебания сетевого напряжения в точке *A*, находящейся на достаточном расстоянии от крайних значений напряжения.

Значения напряжения в промышленных искровых разрядниках находятся в отношении 2 : 3, и если рабочая точка *A* лежала бы при относительном напряжении 2,5, то пределы колебаний эксплуатационного напряже-

ния составляли бы ±0,5, а для надежной работы 0,25 при соответствующем резерве надежности; таким образом, можно работать с допустимым колебанием

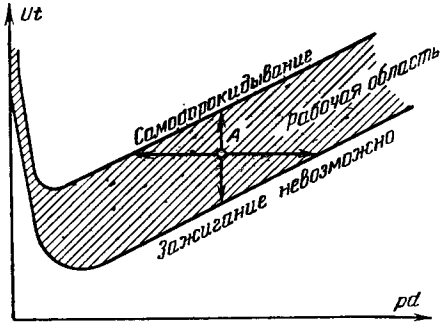


Рис. 199. Кривая Пашена для поджигаемого искрового разрядника. Рабочая точка *A* должна находиться в центре рабочей области, для того чтобы исключить пробой без поджигающего импульса, так же как и отсутствие срабатывания при надежном зажигании.

эксплуатационного напряжения ±10%. Поэтому часто можно отказаться от стабилизации источника напряжения.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ОПТИКИ С ИСКРОВЫМИ РАЗРЯДАМИ

а) Автомобильный аппарат обгонной сигнализации

Наиболее широкое применение до настоящего времени импульсно-оптический принцип находит в автомобильных установках обгонной сигнализации [Л. 59].

Введение автомобильных аппаратов обгонной сигнализации наряду с возможностью значительно повысить безопасность движения позволяет специальным автомашинам (например полицейским, пожарным) световыми импульсами дать приказ освободить дорогу. При этом каждая автомашина имеет приемный прибор с устройством обратной сигнализации, так что обгоняющий автомобиль может контролировать получение и выполнение приказа.

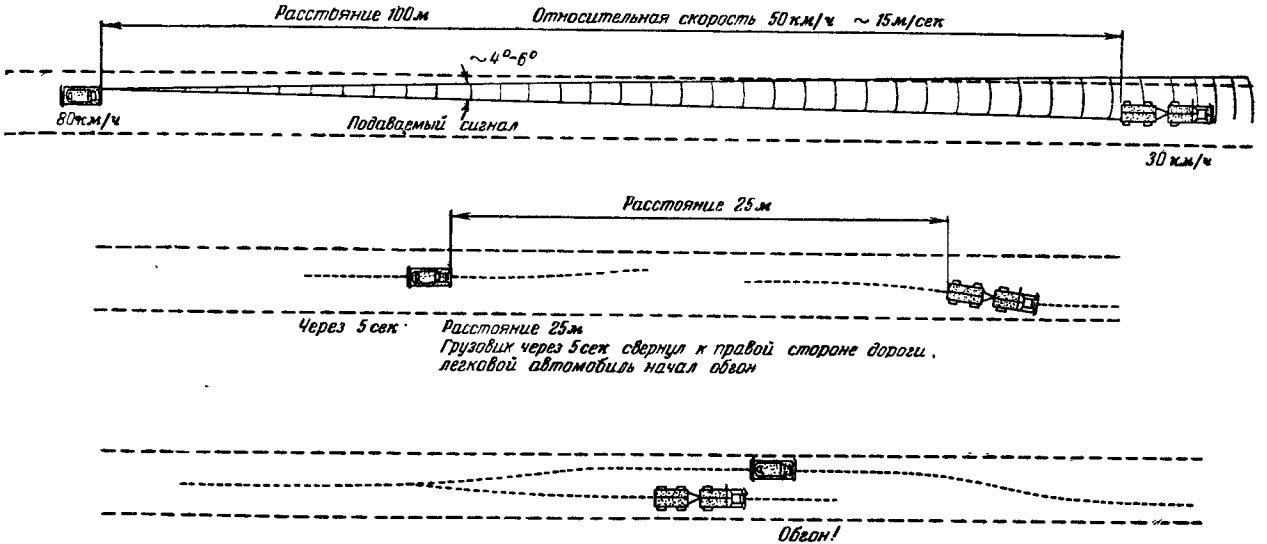


Рис. 200. Способ обгонной сигнализации световым импульсом. Легковой автомобиль дает сигнал световым импульсом на расстоянии 150 *м* до обгона грузовика. Он принимается фотоэлементом импульсного приемника и обеспечивает заблаговременный поворот грузовика направо.

Способ действия показан на рис. 200 на движущихся автомашинах и на рис. 201 — при световых помехах.

Атмосферный грозовой разряд хотя и медленнее на три порядка, чем искровой разряд, используемый здесь, однако при известных обстоятельствах в побочных разрядах или боковых каналах грозовых разрядов могут возникать высокочастотные импульсы света, которые имеют сходную крутизну возрастания. Для того чтобы исключить помеху, вызываемую этим явлением, применяют непрерывную последовательность световых вспышек. На практике не наблюдается, чтобы в одном и том же грозовом разряде было 5 отдельных вспышек со скоростью чередования 20—50 вспышек в 1 *сек*, которые минимально необходимы для нарушения работы устройства. Поэтому это устройство практически гарантировано от помех. Центр тяжести спектра мощного искрового разряда [Л. 3] лежит в ближней и средней частях ультрафиолетовой зоны, однако, в качестве средства передачи применяют исключительно видимый свет, так как в автомобильной технике применяются оптические элементы из стекла; подобно этому фотоэлементы и баллоны ламп можно изготовлять из стекла, пропускающего ультрафиолетовые лучи, однако стоимость их очень высока.

Так как требуемая дальность действия составляет только 100 *м*, можно, само собой разумеется, отказаться от ультрафиолетовой области спектра. Поэтому при конструировании элементов устройства можно положить в основу применение спектральной области между желтой и фиолетовой.

Генератор сигналов схематично представлен на рис. 202. Генератор сигналов [Л. 64, 65], встроенный в легковую автомашину для сигнализации при обгоне, должен излучать в направлении движения световые импульсы с частотой следования 20—50 импульсов в 1 *сек* с использованием наиболее простых и доступных конструктивных элементов. Здесь *T* представляет собой небольшой трансформатор с разомкнутым сердечником с коэффициентом трансформации около 40 с низкоомной первичной обмоткой, принципиально соответствующий искровой индуктивной катушке Румкорфа. Перед этим трансформатором в месте сильного магнитного рассеяния, например при вытянутой форме у одного из концов

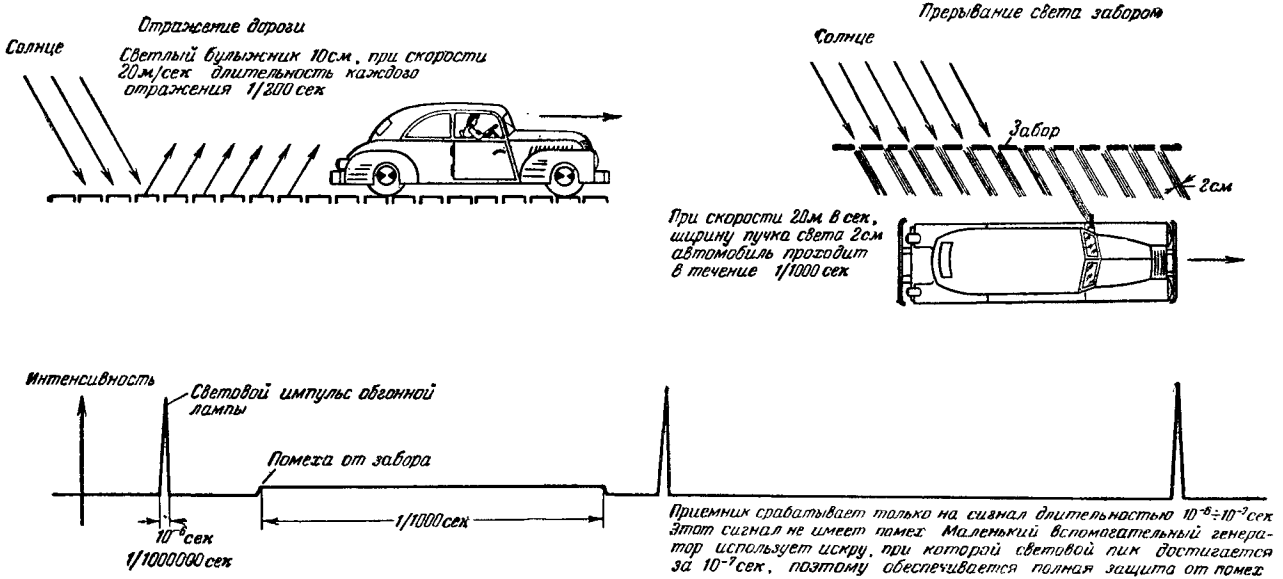


Рис. 201. Возможные оптические помехи при сигнализации, которые делают необходимым ограничение полосы пропускания прнемника.

железного сердечника, расположен молоточек Вагнера *H*, который периодически с частотой следования импульсов прерывает ток. *C1* — обычный искрогасительный конденсатор. Всякий раз, когда после замыкания молоточка *H* ток на первичной обмотке возрастает до определенной величины и создает одновременно определенное магнитное поле, молоточек *H* снова размыкается. Молоточек Вагнера является не только прерывателем, но также и измерителем импульсной энергии. При размыкании моментально освобождается накопленная в первичной обмотке магнитная энергия $1/2\ LI^2$. Она выделяется во вторичной обмотке трансформатора как кратковременный импульс напряжения, который по проводу *L* заряжает конденсатор C_2, непосредственно подключенный к разрядной лампе *F*. Соединительные провода от C_2 к *F* выполняются по возможности короткими и малоиндуктивными. Как только напряжение на C_2 превзойдет напряжение пробоя *F*, наступает искровой разряд.

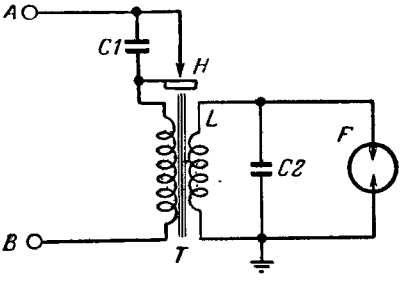


Рис. 202. Принципиальная схема искрового сигнализатора (изготовитель обгонного сигнализатора — фирма Westfälische Metallindustrie GmbH «Hella», Липпштадт). Конденсатор C_2 заряжается при каждом размыкании и дает спонтанную разрядную искру. *T* — трансформатор; *C1* — искрогасящий конденсатор; *C2* — конденсатор; *F* — разрядник; *H* — молоточек; *L* — провода.

На рис. 203 показано влияние индуктивности, расположенной между конденсатором и разрядной лампой. По абсциссе отложена индуктивность проводов в микрогенри, по ординате по линейной шкале — необходимая поверхность катода фотоэлемента при прочих постоянных условиях, получаемая изменением ирисовой диафрагмы.

Кривые, снятые при емкостях 800 и 5 000 *пф* и и 0,136 *мкф*, показывают влияние емкости. Наибольшее ухудшение индуктивность вносит при большой емкости, т. е. малом искровом сопротивлении, и поэтому имеет меньшее значение и допустима индуктивность до 0,2 *мкгн*

при конденсаторах 800 и 5 000 *пф*, обычных в автомобильных аппаратах обгонной сигнализации.

Зарядный ток протекает по проводу L в течение 10^{-5} *сек*, что соответствует длительности существования поджигающей искры в автомобильных устройствах зажигания. Иногда, при избыточной магнитной энергии, возникают многократные разряды *С2*, быстро следующие один за другим, причем величина каждого разряда

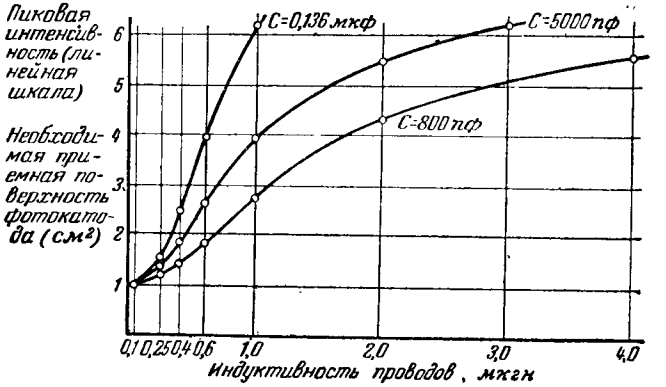


Рис. 203. Влияние индуктивности проводов между конденсатором и лампой сигнализатора по рис. 202 на дальность действия или пиковую интенсивность. Ордината представляет поверхность фотоэлемента, необходимую для приема сигнала.

остается приблизительно постоянной. Так как с точки зрения экономии необходимо простейшее выполнение разрядной лампы, приходится при практической эксплуатации мириться с тем, что возникает рассеивание световых пиков вследствие неодинакового пути искры. Возникающие при этом наиболее слабые и наиболее сильные вспышки относятся, как 1 : 2. Однако среднее значение пика импульса даже при сильных колебаниях напряжения батареи не изменяется, так как молоточек Вагнера размыкает цепь всегда при постоянной величине тока I. Колебания напряжения батареи обусловливают только изменение частоты следования импульсов. Поэтому частота следования импульсов выбирается с допуском 20—50 импульсов в 1 *сек*. Входные зажимы A и B устройства по рис. 202 в простейшем случае под-

ключены параллельно автомобильному гудку. К конденсатору *C2* двойным кабелем подключена импульсная лампочка, содержащая искровой разрядник в инертном газе. При другом исполнении [Л. 5] обычная лампа двойного света снабжена дополнительным электродом, который питается от конденсатора, расположенного на опорном кольце. В этом случае напряжение пробоя составляет только 1—1,5 *кв*. Для компенсации потерь интенсивности используют увеличенную емкость, например 50 000 *пф* [Л. 66]. При этом диаграмма излучения конуса импульсного света подобна диаграмме излучения фары дальнего света. Но так как форма искры не такая, как форма нити накала, получается существенно более широкий угол раскрытия. Оба показанных устройства равноценны с физической точки зрения. Вследствие того что импульс на электроде лампы двойного света имеет отрицательную полярность, искровой разряд не мешает электронной эмиссии раскаленной осветительной нити. Для дальности действия 100 *м* величина разрядного конденсатора составляет 1 000 *пф*. Повышением емкости в 2,5 раза, что возможно без изменения устройства, получают также и при лампах желтого света, которые нашли широкое применение за границей, такой же результат на импульсно-оптических приемниках.

Яркость излучения передатчика в небольших аппаратах обгонной сигнализации составляет в пике 10^7 *стб*. При площади параболического зеркала 50 $см^2$ такая яркость дает в течение 10^{-7} *сек* силу света $50 \cdot 10^7$ *кд* соответственно освещенности на расстоянии 1 *м* [Л. 64, 65] $5 \cdot 10^8$ *лк* или на расстоянии 100 *м* $5 \cdot 10^4$ *лк*. Так как эта освещенность образуется в течение $1 \cdot 10^{-7}$ *сек*, возрастание ее во времени на расстоянии 100 *м* составляет $5 \cdot 10^{11}$ *лк/сек*. Прямой солнечный свет при отвесном облучении даст 10^5 *лк*. Помехи от солнечного света возникнут в том случае, если солнечный свет так быстро изменять во времени, чтобы получилась величина 10^{11} *лк/сек*, т. е. затемнение должно происходить в течение $1 \cdot 10^{-6}$ *сек*. Но такое быстрое затемнение недостижимо даже для автомобиля, проезжающего со скоростью 100 *км/ч* мимо дощатого забора при солнечном свете, проходящем через этот забор. Оно было бы возможно только при скорости много километров в секунду. Использование простейшего светового сигнала в широком объеме становится воз-

можным благодаря применению автомобильной катушки зажигания или катушки Румкорфа. Импульс напряжения, возникающий на ее вторичной обмотке при размыкании первичной цепи, используется в качестве источника напряжения для зарядки конденсатора искрового разрядника, генерирующего свет.

Приемник световых импульсов. Приемник световых импульсов является подобием передатчика сигналов. По точному указанию закона при введении этого способа приемник устанавливается на грузовых автомобилях, величина или длина которых превосходит установленные размеры. Приемник выполнен таким образом, что после поступления пяти световых импульсов, следующих друг за другом, срабатывает электромагнитное реле, которое включает следующее средство сигнализации на приборной доске автомобиля. Кроме того, можно предусмотреть лампу для обратной сигнализации. Аппатура выполняется по схеме рис. 204. Вакуумный фотоэлемент из Cs—Sb срабатывает при поступлении светового импульса высокой частоты; сигнал подводится к одно- или двухступенчатому широкополосному усилителю. Ширина полосы пропускания этого прибора составляет 100 *кгц*—1,5 *Мгц* *. Усиленные выходные импульсы около 100 *мв* подаются на мультивибратор (ждущий), схема которого выполнена таким образом, чтобы только импульс напряжения такой или большей амплитуды приводил к опрокидыванию. Вследствие постоянной времени передающих узлов через 20 *мсек* прибор возвращается в состояние покоя. В анодном контуре последней лампы при каждой вспышке света возникает однократный импульс тока всегда одинаковой величины. Этот импульс тока протекает через электромагнитное реле, которое включено параллельно большому электролитическому конденсатору. Для того чтобы сработало реле, необходимо, чтобы импульсы следовали быстрее, чем утечка заряда конденсатора через обмотку реле. Только в этом случае зарядное напряжение на конденсаторе может стать более высоким, чем напряжение срабатывания реле. Величины нужно подобрать та-

* Повышение ширины полосы пропускания нежелательно. Амплитуда сигнала в соответствии со спектром Фурье отвечает уравнению $I=I_{\text{макс}}(eb)te^{-bt}$ и при более высокой частоте становится намного меньше шумов, которые остаются постоянными.

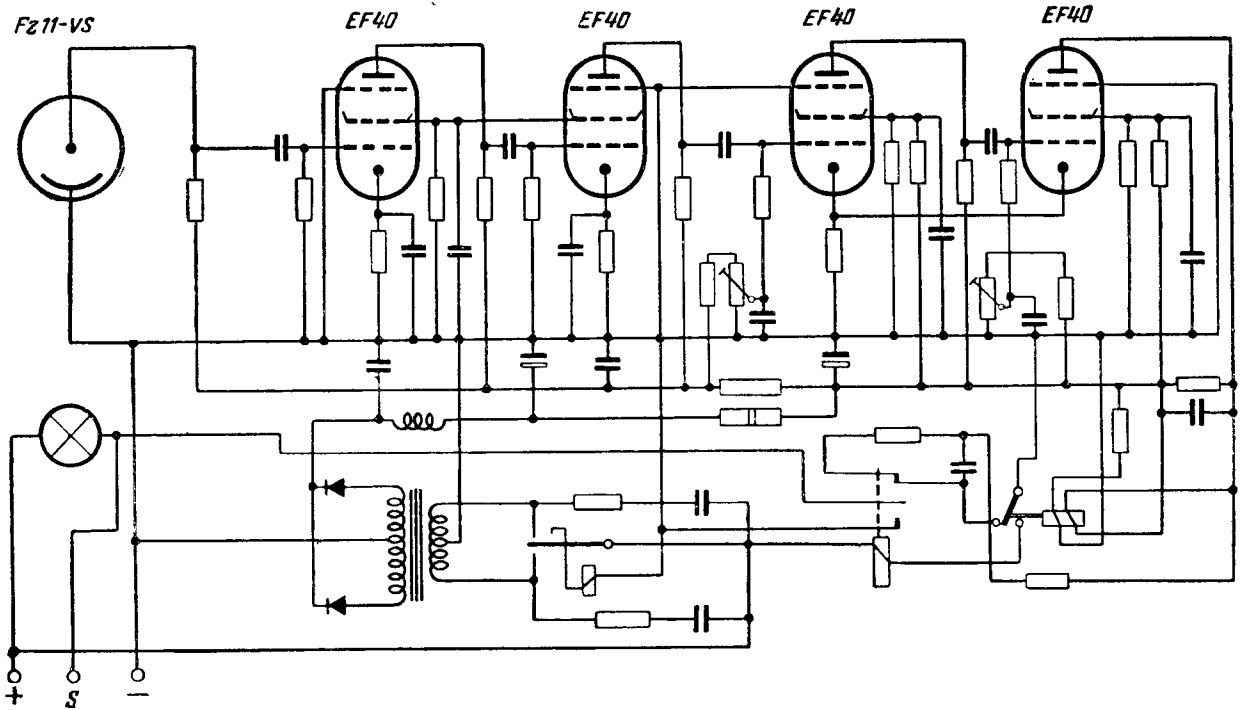


Рис. 204. Схема приемника при способе импульсно-оптической обгонной сигнализации. Две широкополосные усилительные лампы усиливают сигнал, принятый фотоэлементом, и включают мультивибратор, также имеющий две лампы, который воздействует на реле в анодном контуре.

ким образом, чтобы для срабатывания реле было необходимо 5 следующих один за другим разрядов. Если импульсы приходят в медленном темпе, то на конденсаторе не достигается напряжение заряда, достаточное для срабатывания реле. Для величин элементов схемы целесообразно выбрать емкость конденсатора, которая совместно с сопротивлением катушки реле дает постоянную времени около $^1/_2$ *сек*. Благодаря выбору величины *RC*-звена схемы, которая, впрочем, содержит только конденсаторы и сопротивления, с учетом коэффициента усиления отдельной ступени можно достигнуть того, что включение приемного прибора смогут произвести только импульсы света с изменением освещенности более 10 *лк/мксек*, допуская, что они имеют частоту следования, требуемую релейной схемой. Вся схема питается от аккумулятора автомобиля через маленький подключающий прибор посредством вибропреобразователя, трансформатора и полупроводникового выпрямителя при потреблении анодного тока 6 *ма* при 300 *в*. Колебания напряжения на аккумуляторе от —10 до +20% не препятствуют работе прибора. Конструктивные элементы схемы выбраны таким образом, что все сопротивления и конденсаторы могут иметь величину с допуском ±20% с целью простейшего серийного изготовления. Применяемые лампы слабо нагружены, так что длительность их службы можно считать 6 000—10 000 *ч*. Диаграмма приема прибора образована таким образом, что наивысшая чувствительность достигается параллельно оси автомобиля и возможность приема сохраняется еще до угла падения 40°. Лучи, которые падают под бо́льшим углом, уже не улавливаются. Это сделано для того, чтобы избежать сигнализации, например на уличных перекрестках и, таким образом, исключить включение приемника сигнализацией встречных автомобилей. На кривых улицах можно поэтому сигнализировать при сильном смещении обеих осей автомобиля. При плохой видимости (туман, дым или сильные осадки) дальность действия передатчика сокращается значительно меньше, чем зрительная видимость. Это объясняется тем, что фотоэлемент с его приемной оптикой равномерно охватывает большой пространственный угол и не фиксируется, как человеческий глаз, на определенной точке с целью распознавания. При тумане с дальностью

видимости 30 *м* испытание во время движения дало дальность действия 50 *м*; при нормальной видимости дальность действия была 150 *м*.

b) Импульсно-оптический измеритель высоты облаков [Л. 63]

Импульсно-оптический измеритель высоты облаков работает по принципу измерения угла превышения при известном базисе. Пик импульса значительно выше интенсивности рассеянного дневного света и обеспечивает надежную автоматическую работу. Установка с полной автоматической регистрацией дает возможность непрерывной записи высоты облаков и оценки изменений погоды. Высота измерения зависит от вида облаков. Надежно охватывается высота облаков менее 1 200 *м*, но часто также хорошо регистрируются и слоисто-кучевые облака (strato-cumulus) высотой до 2 000 *м*. Точная нижняя граница, естественно, непостоянна, так как здесь дело идет о геометрическом способе. Передатчик и приемник собраны из конструктивных элементов, испытанных в течение многих лет. Оба аппарата защищены от атмосферных воздействий; передатчик расположен в круглом цилиндрическом корпусе с покатой крышей; приемник выполнен в виде колонки (рис. 205) и улавливает, как теодолит, 2 раза в минуту вертикальный луч передатчика. Может быть использована кабельная связь почти любой длины между приемником и записывающим аппаратом, так как по проводам, кроме измерительного сигнала, соответствующего высоте облаков, передается только синхронизирующий сигнал.

Особую ценность имеет высокая длительность службы фотоэлемента, потому что фотоэлемент, даже при светлом рассеянном дневном свете, нагружен только в пределах, допустимых для длительной работы. Благодаря применению высококачественной оптики в сочетании со спектральным фильтром, приспособленным к свету искры, обеспечивается хорошее соотношение сигналов помех и полезных сигналов.

Как базис предусмотрено расстояние в 75—100 *м* *. Место установки может быть выбрано в зависимости от местных условий, однако прожектор должен находиться

* При увеличении базиса из оптических соображений становится невозможной регистрация низких облаков.

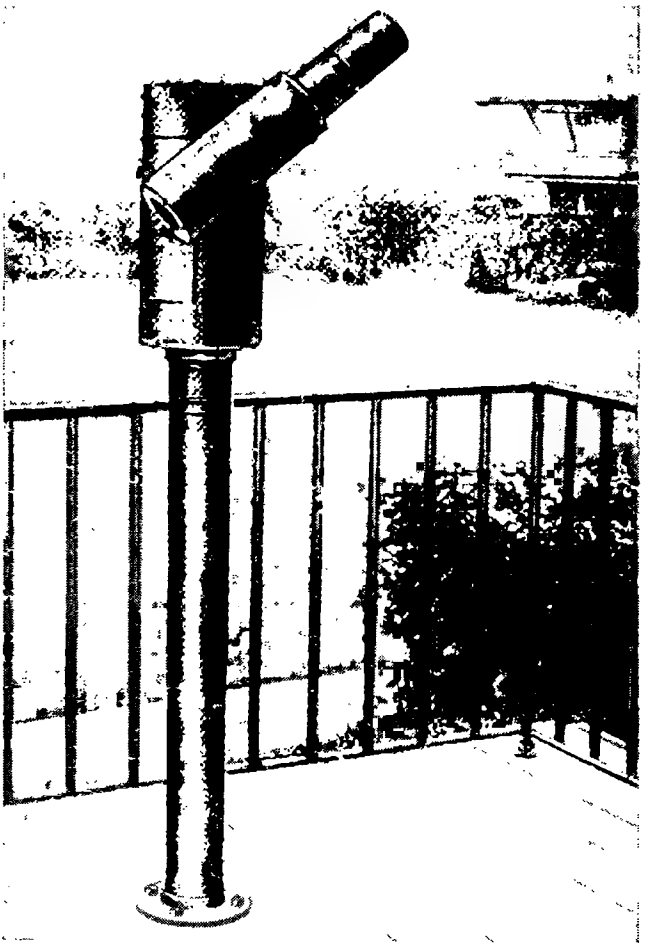


Рис. 205. Приемник импульсно-оптического измерителя высоты облаков. Приемник имеет щелевую диафрагму в плоскости фокуса кварцевой линзы. Он периодически движется вверх и вниз. При каждом принятом отражении от облаков реле кратковременно включает цепь самописца и синхронно движущийся регистрирующий прибор записывает все отражения от облаков. Возможна примерная оценка прозрачности облаков и «точки зрения». Прибор нечувствителен к дневному свету. Тангенциальная функция принципа измерения кинематически линеаризована.

севернее места установки приемника. Если требуется измерение больших высот облаков, выходящих за пределы области регистрирования, можно установить второй управляемый вручную измерительный приемник с увеличенными дальностью действия и базисом.

Описание. Источником света передатчика служит такая же импульсная лампа (рис. 151 и 152), которая испытывалась годами в суперстробоскопах фирмы-изготовителя. Два вольфрамовых электрода и поджигающий электрод встроены в один разборный корпус с керамическим днищем и цилиндром из прочного стекла, через который проходит излучение. Импульсная конденсаторная батарея очень малой индуктивности (около 0,05 *мкгн*) связана с искровой камерой. Она заряжается от трансформатора с выпрямителем. На рис. 206 показана искровая камера, размещенная в фокусе зеркала. Гибкое соединение с конденсаторной батареей, стоящей под зеркалом, производится вместо ленточного провода тремя параллельно включенными коаксиальными кабелями; благодаря этому числу кабелей индуктивность можно сделать чрезвычайно малой. Поджигание, т. е. возбуждение искры, производится поджигающим электродом с управляющей частью. Искра возбуждается в атмосфе-

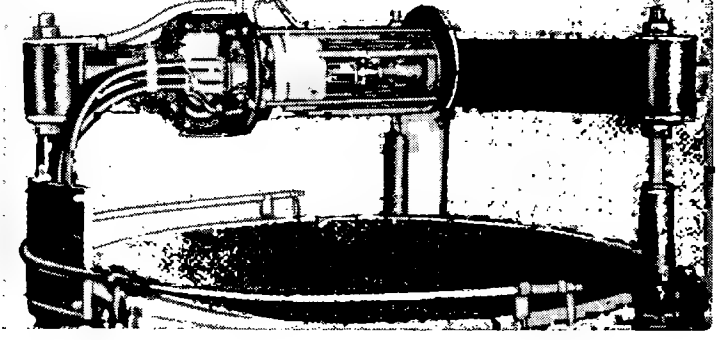


Рис. 206. Импульсная лампа измерителя высоты облаков, расположенная в фокусе рефлектора. Электроды соединены тремя параллельно включенными коаксиальными кабелями с конденсаторной батареей. Искровая камера целиком может быть заменена, например для очистки.

ре аргона. Для этой цели искровая камера подключена медным трубопроводом к маленькому баллону с аргоном с ресивером, который должен сменяться через каждые 6 мес. Благодаря работе в аргоне получают интенсивность света искры в 5 раз больше, чем при работе в воздухе. Вследствие малой индуктивности (0,05 *мкгн*) свет возрастает до максимума в течение 0,15 *мксек* и при этом достигает яркости $(0{,}5 \div 1) \cdot 10^8$ *св/см*^{2}. Свет искровой камеры собирается в пучок параболическим зеркалом с алюминированной поверхностью с дивергенцией лучей около 0,2°. С помощью ватерпаса корпус излучателя выставляется вертикально, так что измеряющий луч входит в облако точно вертикально.

Генерируемый световой импульс имеет непрерывный спектр с используемой спектральной областью 200—1 500 *нм*. (Обычно из-за интереса к визуально наблюдаемой высоте облаков работают со стороны приемника в области 350—600 *нм*.)

Так как измеритель высоты облаков задуман для автоматической эксплуатации, передатчик должен иметь в 10 раз бóльшую интенсивность, чем при вручную обслуживаемых устройствах с визуальным отсчетом, которые работают по принципу радара, так как при этом человеческий глаз может наблюдать за приемником и устанавливать, правильно ли поступает сигнал; при автоматической эксплуатации, напротив, приемник должен требовать существенно более высокого напряжения уровня, чтобы он отмечал облака надежно и независимо от шумов и дробового эффекта дневного света. Переход к полностью автоматической работе сразу делает необходимым применение весьма мощного искрового прожектора с яркостью света в импульсе около 100 млн. *св/см*^{2}. Только такой высокий пик импульса достаточно возвышается над уровнем светлого рассеянного света неба, для того чтобы обеспечить надежную работу. Однако в противоположность суперстробоскопу в измерителе высоты облаков с импульсной лампой соединен дополнительный ресивер так, чтобы при возрастающем нагреве лампы или сильном колебании температуры воздуха давление и вместе с ним условия эксплуатации оставались постоянными.

Разборная искровая камера обеспечивает экономный способ эксплуатации. К каждому аппарату придается

комплект из двух искровых камер. Если после 100—300 *ч* одна камера вследствие распыления электродов становится недостаточно прозрачной, то вставляется другая, а первая очищается в мастерской, с тем чтобы она была готова для следующей замены. Обычно бывает достаточно провести после демонтажа отворачиванием трех барашковых винтов простую очистку стеклянного цилиндра и собрать лампу снова. Работа отнимает около 5 *мин.* Благодаря этому принципу нет необходимости иметь запасные лампы на складе, что облегчает применение установки в местах с плохим снабжением, например на временных аэродромах.

Длительность службы электродов выше, чем в воздушных искровых разрядниках, так как они работают не в окислительной атмосфере воздуха, а в инертном газе аргоне.

При конструировании приборов для питания током обращалось внимание на то, чтобы не применялась никакая электроника. Трансформатор устойчив против коротких замыканий, выполнен как трансформатор с рассеянием и вследствие этого одновременно ограничивает частоту вспышек. В качестве выпрямителя использован сухой селеновый выпрямитель, который расположен в масляном баке трансформатора.

Потребляемая импульсным прожектором мощность составляет 400 *вт*. Дополнительно встроены два нагревательных стержня, которые повышением внутренней температуры обеспечивают сухую воздушную атмосферу в аппарате, уменьшение осадков на крышке и таяние снега. Нагрев автоматически выключается и включается ступенями в зависимости от температуры. Для исследовательских целей или при военном использовании можно также работать на чисто ультрафиолетовом излучении. В этом случае лампа имеет кварцевый цилиндр и фильтр, крышка изготовлена из плексигласа.

Приемник. В качестве приемника применяют импульсно-оптический трехламповый усилитель, который состоит из высоковакуумного фотоэлемента с цезиево-сурьмянистым катодом и двух последовательных ступеней широкополосного усиления. Выходную нагрузку образует мультивибратор с одним устойчивым положением с быстродействующим реле в анодном контуре. При конструировании приемника нужно обращать внимание на

то, чтобы нигде не употреблялись размыкающиеся релейные контакты, так как они вызывают недостаточно подавляемые бегущие волны в кабельной системе, которые могут вести к ошибочным включениям. Вместо этого применяют только замыкающие контакты, которые служат как для измерения, так и для синхронизации с самописцем; длительность службы реле с такими контактами может быть почти неограниченной.

Перед вакуумным фотоэлементом помещена щелевая диафрагма с соответственно отрегулированной шириной щели. Диафрагма обычно поворачивается автоматически таким образом, что при увеличении угла возвышения, когда отраженный свет возвращается, диафрагма открывается; при меньшем угле возвышения щель становится автоматически у́же, для того чтобы достичь максимальной точности измерения. Отражающая оптика приспособлена для сине-фиолетовой части спектра пика светового импульса. Отношение полезного сигнала к сигналу помех повышается спектральным фильтром, так как цветовая температура излучения искры лежит выше, чем света Солнца или небосвода.

Допускаемая нагрузка фотокатода — около 4 *мка*. Диаметр оптики при настройке с диафрагменной системой выбирается так, чтобы работать также и в светлый день в пределах этой границы. Благодаря этому фотоэлемент работает столь же долго, как и комплект ламп приемника. Плоскость визирования приемника должна быть направлена на север, чтобы исключить отражение солнечного диска.

Приемник, т. е. фотоэлемент с оптикой и трехкратным усилителем, помещен в водонепроницаемую трубу и при включении направляется синхронным двигателем под надлежащим углом.

Самописец. Самописец имеет пишущий рычаг со штифтом для записи искры; он имеет привод от синхронного мотора, как приемник, и контролируется вспомогательным контактом. Благодаря применению синхронного электродвигателя становятся излишними многожильные передающие провода от приемника к записывающему прибору. Требуется только, чтобы как приемник, так и пишущий прибор потребляли энергию из одной сети. Требования к качеству кабеля не превышают требований, предъявляемых к качеству телефонных про-

водов. Ширина бумаги 110 *мм*, точность отсчета выше, чем 1° угла возвышения.

Точность измерения. Допускаемая точность измерения для соответствующей нижней границы облаков составляет ±0,5 углового градуса.

При базисе 75 *м* это соответствует:

Установка угла	Высота облаков	Ширина разброса (±)
70°	250 *м*	6,25 *м*
80°	440 *м*	18,0 *м*
84,5°	800 *м*	~50,0 *м*

Дальность действия при автоматической записи (базис 75 *м*) в зависимости от вида облаков составляет 1 000—2 000 *м*. Для измерения более высоких облаков рекомендуется увеличить базис с 75 до 100 *м*, причем, однако, в области малых углов по закону Ламберта интенсивность часто становится слишком слабой.

Оптику передатчика и премника для увеличения высоты измерения нецелесообразно изменять, так как при применении бо́льших линз или зеркал фотоэлемент приемника стал бы недопустимо нагруженным, а форма передатчика — неудобной.

В противоположность описанным выше тригонометрически работающим автоматическим устройствам существует конструкция, работающая с измерением времени прохождения луча (световая локация).

Принцип. Измеритель высоты облаков представляет собой локатор, который работает со световыми импульсами. Его принцип состоит в измерении времени, которое необходимо световому импульсу для того, чтобы быть излученным и отразиться от облака (эхо). Эхо наблюдается на световом экране катодного осциллографа.

Работа передатчика. Искра возбуждается между вольфрамовыми электродами. Для разряда имеется конденсатор 0,1 *мкф*, заряд которого производится посредством выпрямителя, пригодного для напряжения до 10 000 *в*. Для уменьшения сильного обгорания (искровой разрядник работает в воздухе!) он подключается для измерения только кратковременно.

Специальный слюдяной конденсатор расположен непосредственно над искровым разрядником, для того чтобы уменьшить самоиндукцию контура.

Моментальная электрическая мощность искры составляет 5 *Мвт* при длительности приблизительно 1 *мксек*. Аппарат зажигания, синхронизированный с частотой сети, зажигает 25 искр в 1 *сек* (поджигающий штифтовой электрод).

Работа приемника. Спектральная чувствительность фотоэлемента согласована с энергетическим спектром искры. Фотоэлемент сильно перегружается дневным светом при применении светосильного приемного зеркала. Поэтому магнитный затвор освобождает его только для собственно измерений.

Принятый импульс света в виде электрического импульса усиливается в катодной ступени и от ступени предварительного усиления соединительным кабелем с согласованным полным сопротивлением подводится к главному усилителю. Он снова усиливает сигнал и передает его на измерительный пульт.

Работа измерительного пульта. Измерительный пульт состоит из электронно-лучевой трубки с электростатическими разверткой и фокусировкой, на которой считывают удаление и величину сигнала. Удаление считывают по абциссе, а амплитуду — по ординате.

Синхронизирующий импульс, который поступает на приемник одновременно со световым импульсом, включает горизонтальную развертку слева направо по экрану трубки.

Световое пятно пробегает по экрану за время, которое необходимо свету для того, чтобы достичь слоя облаков на высоте 1 500 *м* и вернуться к приемнику.

Импульс, который принимается приемником и усиливается для передачи на индикатор, действует на вертикальное отклонение светового пятна, а именно на то место горизонтальной линии, которое соответствует высоте измеряемого слоя облаков.

Общий коэффициент усиления системы составляет всего 800 000 при ширине полосы 10 *кгц* — 1 *Мгц*. Посредством цепи задержки, регулируемой в пределах 0,1—2 *мксек*, можно компенсировать задержку, возникающую в кабелях и синхронизирующем контуре.

Эталонный осциллятор, генерирующий частоту 1 500 *кгц*, возбуждает на световой дорожке ряд светящихся точек. Эти точки служат отметками высоты, причем расстояние между двумя точками соответствует

100 *м* (свету необходимо $^2/_3$ *мксек* для прохождения туда и обратно расстояния 100 *м*).

Электронный фазорегулятор позволяет сдвигать по световой дорожке световую отметку, связанную с кнопкой регулировки шкалы.

Если световая марка установлена на эхо, можно по шкале считывать высоту облаков прямо в метрах.

Наконец, вторая световая дорожка, которая не зависит от эха и поэтому всегда прямолинейна, записана с такой же частотой (25 герц) под первой. Она дает возможность замечать очень слабое эхо.

Расстояние между двумя световыми дорожками можно регулировать как угодно.

Преимущество локационного измерителя высоты облаков заключается в высокой точности (постоянная ошибка считывания) на больших высотах, которая равна высокой точности тригонометрических приборов для малых высот (функция тангенса).

с) Трансмиссометр. Импульсно-оптический измеритель видимости

Превращение в световой импульс конденсаторных разрядов с очень большой постоянной времени находит применение в технике импульсно-оптических трансмиссометров.

Для того чтобы яснее очертить постановку задачи для читателей, работающих вне метеорологии, описанию прибора для измерения видимости предпосланы следующие ниже несколько строк.

Техника приборов, измеряющих видимость, возникла более 30 лет назад благодаря требованиям авиации. Эти требования не оставались неизменными, так как они неразрывно связаны со всем ходом развития авиации и улучшившейся безопасностью при очень высоких скоростях приземления.

В то время как приборы для измерения видимости до последнего времени должны были выполнять задачу измерения в пределах допускаемой дальности видимости для посадки самолетов, т. е. от 300 *м* до теоретически бесконечной дальности, сегодня развитие способов приземления дает возможность летчику даже при очень сильно уменьшенной видимости благодаря применению очень ярких осветительных или импульсных ламп

на посадочной полосе производить еще посадку при дальности видимости менее 300 *м*. Яркие прожекторные устройства, которыми уже оснащены некоторые аэродромы, просвечивают дым и туман по сравнению с простыми лампами накаливания с подачей света в 10^3—10^6 раз больше так, что усиление поглощения воспринимаемого глазом светового сигнала в 10^6 раз еще может быть принято как граница для надежной посадки. Но такое гашение лежит уже в области очень малых значений дальности видимости. Обычный измеритель дальности видимости с тройным зеркалом позволяет только с трудом производить во время тумана измерения, так как рассеивание отраженного излучения из-за тумана наслаивается на свет, отраженный от зеркала.

Для того чтобы устранить затруднения в измерениях при плохой видимости, автор создал импульсно-оптический способ передачи сигналов в установках для измерения дальности видимости. При этом передатчик импульсных излучений имеет яркость амплитуды светового импульса приблизительно 10^7 *св/см*^{2}, в то время как в лампах накаливания она не превосходит 1 000 *св/см*^{2}, причем последняя должна быть уменьшена в 4 раза вследствие требуемой модуляции, так что отношение интенсивности между светом лампы накаливания и импульсным светом примерно 250 : 100 000 000.

Это чрезвычайное повышение мощности передатчика никоим образом не требует высокой мощности, потребляемой из сети, так как импульсы длятся менее 1 *мксек* и имеют очень малую энергию. Кроме того, экспериментально доказано, что достаточна частота следования импульсов 5 импульсов в 1 *сек*, так что средняя мощность импульсной лампы составляет только несколько ватт.

На обычном стандартном расстоянии около 150 *м* от импульсной лампы в передатчике трансмиссометра расположен импульсный приемник, в котором регулировка уровня производится автоматически по поступающей амплитуде импульса подобно саморегулирующемуся радиоприемнику.

Получена почти линейная простая логарифмическая регулировочная кривая в пределах измерения $1 : 10^5$. Это означает, что регулировочное напряжение является логарифмом ослабления импульсного света. С помощью

регулирования можно получить непосредственно визуальную дальность видения при дневной и ночной эксплуатации. Регулировочное напряжение превращается измерительной лампой в постоянный измерительный ток и подводится по проводам любой длины в самопишущий миллиамперметр. Оптические зависимости угла сохраняются, например угол, принятый приемником, сохраняется с точностью нескольких десятков угловых минут.

В связи с требованиями создания нового импульсно-оптического трансмиссометра передатчик и приемник были также сконструированы в соответствии с современными требованиями безопасности эксплуатации самолетов. Для того чтобы обеспечить возможность работы при снегопаде без перерыва в эксплуатации, в аппарат встроен вентилятор, который создает избыточное давление более высокое, чем давление ветра. Поэтому система диафрагм не может засоряться. Встроенная система обогрева, которая включается в зависимости от температуры, создает равномерную сухую атмосферу внутри аппарата одновременно с оттаиванием возможного налета льда.

Для того чтобы сделать устойчивым против бокового ветра очень остро направленный приемник, отказались от классической вытянутой формы и создали новую систему диафрагм применением системы зачерненных трубчатых фильтров, образующих пучок труб, расположенных одна около другой. Благодаря этому конструкция укорочена примерно на 80 *см* и приемнику придана плотная массивная форма, нечувствительная к боковому ветру.

Аппарат допускает непосредственную запись со шкалой изменений поглощения $1:10^5$, соответствующей дальности видимости от 40 *м* до бесконечности. Так как прибор имеет логарифмическую шкалу, он соответствует практическим требованиям, потому, что чувствительность глаза также строго логарифмическая. Поэтому, естественно, очень большая дальность видимости кажется сильно сжатой, наиболее интересные средние и малые дальности видимости, напротив, сильно растянуты.

Чисто технически развитие аппарата исходило, несмотря на требуемые затраты, из того, чтобы создать передатчик и приемник, обеспечивающие очень длительную беспрерывную работу без промежуточного обслужи-

вания. Фотокатод вакуумного фотоэлемента (Cs—Sb) приемника так слабо нагружен равномерным светом, что можно рассчитывать на годовую длительность работы без снижения чувствительности. Катодный ток составляет около 0,1 *мка*. Набор ламп приемника комплектуется из промышленных ламп с большой длительностью службы с годовой гарантией длительности горения.

Крутизну характеристики лампы, медленно падающую во время эксплуатации, можно без затрат компенсировать юстировкой калибрирующим потенциометром самописца.

В качестве передатчика служит ксеноновая импульсная лампа, соответствующая табл. 15, с небольшой импульсной конденсаторной батареей с малой температурной зависимостью. Энергетические величины разрядного контура принимаются, исходя из следующих соображений: распыление электрода при кратковременной искре обусловлено в первую очередь ударной волной. Можно сделать крутизну и энергию искры такой величины, чтобы ударная волна была «ниже критической», т. е. ее силовое воздействие еще не разрушало электродный материал. Благодаря этому распыление электрода становится настолько малым, что вполне возможна 6-месячная беспрерывная длительность эксплуатации. Разрядный контур питается от стабилизированного аппарата высокого напряжения с селеновыми выпрямителями.

Так как энергия разряда и геометрия лампы остаются постоянными, проскакивание искры является единственной переменной. Благодаря применению зеркала с рассеивающей поверхностью можно при приеме широкой лучевой диаграммы исключить статистические скачки направления искры относительно средней оси. Дополнительно у приемника значение амплитуды усредняется примерно для 20 искр. Искровые вспышки при таком усреднении по времени имеют такое высокое постоянство, что можно отказаться от оптической компенсации.

Испытание устройства производится выключением передатчика, что соответствует нулевой дальности видимости или же при помощи самописца в условиях очень хорошей видимости. Последнее можно также дополнительно получить импульсом вспомогательного света маленькой лампочки накаливания для калибровки приема.

Детали установки с трансмиссометром

Импульсный передатчик. Световой импульсный передатчик служит для генерирования светло-голубых или ультрафиолетовых вспышек света с максимальной яркостью при постоянном во времени среднем значении амплитуды импульса. Он состоит из импульсной лампы и электрического импульсного генератора. В качестве импульсной лампы используется искровой разрядник с инертным газом. Для длительной эксплуатации в видимой светло-голубой спектральной области используют упоминавшиеся импульсные лампы с ксеноновым наполнением, которые имеют напряжение пробоя 3,1 *кв*.

Для измерения в ультрафиолетовой спектральной области, как и для научных работ с изменениями яркости, запаянные импульсные лампы заменены разборными импульсными лампами системы Фрюнгель, которые снабжены кварцевым цилиндром и электродами с переменным расстоянием. Кроме того, можно работать с любым наполняющим газом под любым давлением, благодаря чему спектр излучения и яркость могут быть согласованы с требованиями эксперимента.

Напряжение пробоя разборной лампы устанавливается путем регулирования расстояния между электродами также равным 3 *кв*, как и в запаянных лампах, чем создаются равные условия эксплуатации.

Электрическая импульсная часть также встроена в корпус прожектора. Она состоит из маленького однофазного трансформатора со вторичным напряжением 500 *в* и каскадного выпрямителя (рис. 207) Gr1—Gr6 с конденсаторами C1—6. Выходное напряжение при холостом ходе $6U\sqrt{2}=4\,200$ *в*; характеристика гиперболическая, т. е. произведение тока и напряжения является постоянным. Благодаря этому достигают работы с постоянной мощностью разрядного контура C_7-F. Частота импульсов первоначально устанавливается с помощью R_2.

Особое достоинство аппарата заключается в преимущественном излучении светло-голубого света. Этот факт дает возможность в соответствии с рис. 208 (из книги «Vision through the atmosphere», W. E. Knowles, Middleton, вышла из печати в 1952 г. в University of Toronto Press) измерить дальность видимости более 1 *км*, так как синяя область спектра по сравнению

с белым или красным светом показывает существенно более сильное относительное поглощение. Вследствие этого точность измерения при колеблющейся видимости в большой области измерения (1—50 *км*) или малой облачности существенно выше, чем у трансмиссометров, применяющих свет ламп накаливания. При применении

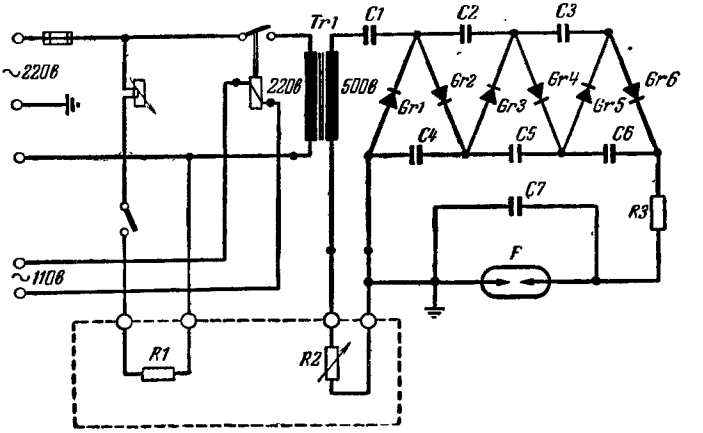


Рис. 207. Схема генератора импульсно-оптического измерителя дальности видимости. Искровой разрядник заряжается каскадной схемой и периодически с частотой несколько герц опрокидывается с помощью разряда конденсатора C_7 искровыми разрядами с постоянной средней энергией. Нагреватель с автоматическим тепловым выключателем освобождает от льда прибор, длительно работающий в зимних условиях.

искровых камер с кварцевым цилиндром можно этот эффект еще повысить благодаря использованию ультрафиолетовой части излучения. В области очень малой видимости, например в тумане (рис. 208) любой вид света (безразлично — красный или синий) рассеивается одинаково. Туман, как известно, белый, а не цветной. Поэтому использование синего или ультрафиолетвого импульса света дает в этой области более сильное затухание по сравнению с длинноволновым спектром. Но можно полностью использовать крайне высокую амплитуду излучения импульса, для того чтобы измерить поглощение, которое лежит вне области визуального измерения.

Применяют фотоэлемент с цезиево-сурьмянистым катодом, чувствительным к синему свету. Принятый импульс света в виде импульса напряжения длительностью около 1 *мксек* передается от фотоэлемента к последующему регулируемому широкополосному усилителю, собранному на четырех лампах. Коэффициент усиления автоматическим регулированием сеточного напряжения изменяется в пределах 10^{-1}—10^{-4} соответственно регулирующему напряжению от 17 до 2 *в*. Выходной импульс этой лампы подается на управляющую сетку однотактного мультивибратора. При попадании импульсного света вследствие анодного импульса сеточное напряжение увеличивается до такого отрицательного значения, при котором коэффициент усиления регулирующей лампы снизится настолько, что амплитуда на выходе станет недостаточной для того, чтобы выключить мультивибратор. Пока не поступает никаких импульсов от мультивибратора на сетку, сеточное напряжение медленно снижается до нуля и как следствие при этом возрастает усиление. Таким образом, автоматически устанавливается такое усиление, что получается равновесие между постоянной времени, усилением и амплитудой импульса.

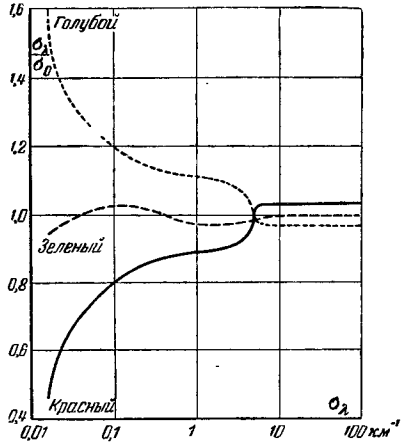


Рис. 208. Кривая затухания по Миддлетону, Фойтцигу и Кошмидеру. В области малой дальности видимости (в правой части рисунка) для передачи нельзя предпочесть ни одну из длин волн. Облака белые, и в области больших дальностей видимости инфракрасное излучение рассеивается очень незначительно и почти не затухает (инфракрасное фотографирование); коротковолновый синий цвет, напротив, показывает в этом случае сильное затухание. Поэтому чувствительное регистрирование при большой дальности видимости выгоднее производить с коротковолновым излучением, которое благодаря своему импульсному характеру позволяет также охватить излучениями и облака.

Статистические колебания падающего света искр исключены вследствие большой постоянной времени сеточного контура. При отсутствии импульса из-за тумана или затенения приемник работает с максимальным усилением, которое задается остаточным регулировочным напряжением. Это остаточное напряжение составляет около 1 *в* и возникает вследствие шумов входной ступени усилителя.

Благодаря описанному здесь применению трансмиссометров удается проводить объективное измерение поглощения по логарифмической шкале от плотного тумана до бесконечно большой видимости, которое определяет визуальную дальность видимости. Передача измеренного значения на самописец возможна по кабелю любой длины.

М. ИМПУЛЬСНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

1. ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

а) Постановка задачи

Необходимо предъявлять особые требования к схемам, применяемым для зарядки импульсных конденсаторов установок высокого напряжения. Как conditio sine qua non[1] необходимо требовать, чтобы зарядный аппарат высокого напряжения не боялся короткого замыкания и блуждающих волн перенапряжения. Любая конденсаторная батарея в первый момент зарядки, пока напряжение на конденсаторах не становится заметным, для источника высокого напряжения представляет омическое короткое замыкание. При спонтанном разряде конденсатора освобождаются большие количества энергии, которая с двух сторон разрядного промежутка, например искрового разрядника, распространяется в виде блуждающих волн перенапряжения и неизбежно попадает в источник высокого напряжения. Поэтому защитные мероприятия от таких блуждающих волн требуются во всех случаях. Ниже, основываясь на промышленном типе, представлен импульсно-прочный аппарат высокого напряжения в форме переносного чемодана для зарядки

[1] Conditio sine qua non — обязательное условие (лат.).

конденсаторов в качестве примера маломощного аппарата высокого напряжения, типичного для класса подобных зарядных устройств.

b) Испытательный аппарат высокого напряжения для импульсных исследований

Изолекс «К» — переносный аппарат высокого напряжения (вес около 28 *кг*) с плавным регулированием постоянного напряжения от 0 до 50 *кв*, предназначенный для зарядки емкостей. Аппарат рассчитан для подключения к сети переменного тока напряжением 220 *в*. Подвод высокого напряжения к испытываемому объекту производится штеккерным соединением высокого напряжения и концентрическим кабелем высокого напряжения с наружным заземлением. Схема выполнена таким образом, что при превышении тока, равного 4 *ма*, например при возможном пробое, аппарат автоматически выключается; более высокий зарядный ток можно получить кратковременно при кнопочном управлении (10 *ма* в течение 3 *мин*) [Л. 107, 108].

Аппарат представлен на рис. 209, а его схема[1] — на рис. 210.

После открытия крышки становится видимой спереди справа кассета кабеля для подключения к сети. За нею между двумя сетевыми предохранителями *2а* расположен включатель сети. Поворотная ручка, расположенная справа, обслуживает регулировочный трансформатор. Нельзя сразу включать высокое напряжение; поворотная ручка должна всегда находиться в начальном нулевом положении. Сразу после поворота ручки срабатывает встроенное реле блокировки повторного включения и дает возможность поднимать высокое напряжение. Установленное напряжение непосредственно считывается в киловольтах (собственное потребление 100 *мка*). В аппаратах с двумя пределами измерения применяют прибор на ток 20 *мка*, обычно с шунтом 100 *мка*. При нажатии кнопки на приборе $\times 5$ шунт отключается так, что максимальное измеряемое напряжение составляет

[1] Эта схема имеет постоянную выходную мощность, т. е. гиперболическую характеристику $UI = \text{const}$. Приборы этого вида (см. также рис. 207) применяются там, где к цепи полезной нагрузки должна подводиться всегда постоянная мощность.

12 *кв*. Справа от киловольтметра расположен индикатор сети (лампа тлеющего разряда, в схеме обозначена *Gl1*), слева от него — сигнальная лампа *Gl3* счетчика кулонов. Тумблер, расположенный под миллиампер-

Рис. 209. Переносный прибор «Изолекс» 50 *кв* с плавно регулируемым напряжением, селеновыми выпрямителями, собранными по каскадной схеме; выход высокого напряжения расположен сбоку.

тром, в положении «миллиамперы» включает в измерительный контур прибор, измеряющий ток, а в положении «счетчик кулонов» каждый раз после полной зарядки измерительного конденсатора, соответствующего протекающему через испытываемый объект числу миллиамперсекунд, загорается сигнальная лампа *Gl3*.

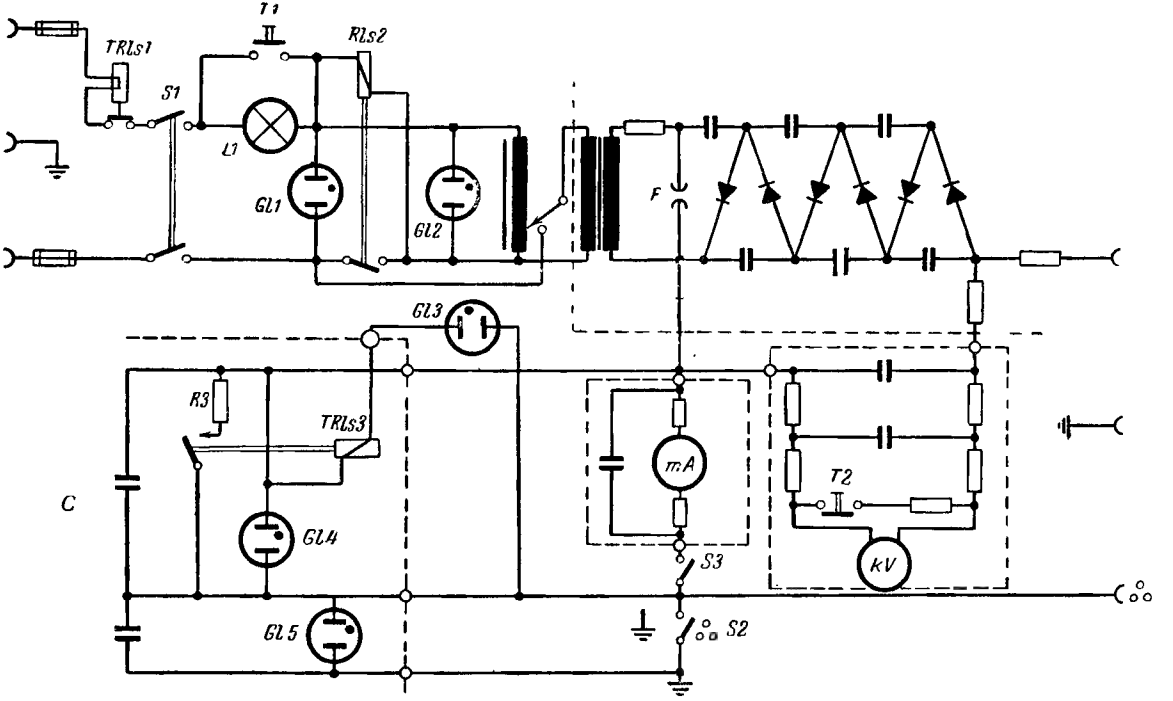


Рис. 210. Схема импульсного, устойчивого при коротких замыканиях высоковольтного прибора с гиперболической вольт-амперной характеристикой зарядки конденсаторов («Изолекс») со встроенным счетчиком кулонов.

Гайка-барашек на лицевой панели служит для заземления прибора и испытываемого объекта. Прибор постоянно должен быть заземлен массивным проводом, так как из испытываемого объекта с большой емкостью в момент пробоя может выделиться большое количество энергии и тогда при недостаточном сечении заземляющего провода напряжение на переносном приборе повысится до нежелательно высокого значения.

Обычно отрицательный полюс расположен слева внизу на выходной втулке, в которую вставляется штекер высокого напряжения. Положительный полюс находится на массе. При замерах кабеля измерительным мостом для определения места повреждения, когда определяют замыкание на землю, недопустимо, чтобы положительный полюс испытательного прибора высокого напряжения был жестко соединен с землей. Поэтому в переносном аппарате чемоданного типа встроен специальный выключатель (рис. 210, *S2*), который при потенциометрической схеме измерения отключает положительный полюс прибора от клеммы заземления. Однако встроенный делитель напряжения с лампой тлеющего разряда, которая срабатывает при напряжении 350 *в*, уменьшает нежелательное высокое напряжение между землей и положительной втулкой, но гальванически положительный полюс, пока делитель не сработает, высоко изолирован от земли.

Аппарат работает по каскадной схеме; трансформатор защищен искровым разрядником F от блуждающих волн, которые могут возникнуть при спонтанном пробое испытываемого объекта, за счет освобождения энергии. Ступени каскада сами защищены сопротивлениями таким образом, что обычная бегущая волна, которая возникает в испытываемом объекте, гаснет в схеме. Благодаря каскадной схеме с низким напряжением на трансформаторе вес аппарата можно сделать малым, причем, несмотря на то, что полный ток короткого замыкания трансформатора, ограниченный только внутренним сопротивлением трансформатора и выпрямителя, как и защитой от бегущей волны, отбирается в течение 3 *мин* при нажимании кнопки $I_{макс}$ (на схеме рис. 210 обозначена T_1), которой замыкают накоротко расположенную в первичном контуре автотрансформатора ограничительную лампу L_1. Эта лампа не видна на

передней панели, так как она расположена внутри; это криптоновая лампа накаливания на напряжение 220 *в* мощностью 100 *вт*. Применением этой лампы делают прибор «мягким» по току. При превышении 3 *ма*, т. е. при любом коротком замыкании испытываемого объекта, она зажигается, уменьшая этим напряжение на автотрансформаторе, и устраняет блокировку включения. Только в том случае, когда нужно получить от сети ток выше 3 *ма* (например, 3—10 *ма*), нажатием предусмотренной для этого кнопки эта лампа накаливания выключается и кратковременно отбирается полный ток короткого замыкания. Такая нагрузка, подобная короткому замыканию, однако, не должна действовать более 3 *мин*. Допустимый длительный ток аппарата составляет 3 *ма*.

При испытании объектов, у которых неизвестно, заземлена ли масса, между заземлением прибора и кабелем, также как и между втулкой высокого напряжения и кабелем, должно быть включено зарядное сопротивление высокого напряжения, например от 100 *ком* до 1 *Мом*. Благодаря этому избегают возрастания напряжения на жиле при спонтанном пробое испытываемого объекта вследствие мгновенного пробоя другой испытательной жилы, которая может быть связана с заземленной стороной аппарата. Это защитное мероприятие вообще излишне, если заземление чемодана безупречно, так что даже ударная волна не в состоянии поднять потенциал наружного корпуса до нежелательно высокого значения.

Аппарат дополнительно имеет два гнезда для подключения осциллографа. Гнезда находятся на левой стороне лицевой панели: красное гнездо — плюс, черное — минус. Над гнездами находится тумблер. В положении «осциллограф» он выключает встроенные конденсаторы.

В аппарат встроен так называемый счетчик кулонов [Л. 109]. Конденсатор C заряжается до срабатывания лампы тлеющего разряда $Gl3$ и через контакт реле TRl_s3 немедленно снова разряжается на сопротивление $R3$. Измерение тока превращается здесь в измерение времени.

c) Измерение емкости счетчиком кулонов

Счетчик кулонов в соединении с вольтметром позволяет производить также точное определение величины емкости, например емкости кабеля, или при испытании конденсаторов измерять их емкость.

В основе этого способа лежит формула

$$CU = It.$$

Произведение It, т. е. число ампер-секунд, соответствует числу миганий счетчика кулонов. Каждое мигание счетчика кулонов представляет в соответствии с данными калибровочной кривой определенное число миллиампер-секунд, так что из общего числа миганий, которые произошли до окончания зарядки конденсатора, получают полное число ампер-секунд, которое имеется в конденсаторе при достигнутом напряжении U, считываемом по вольтметру. C подсчитывается из

$$C = \frac{It}{U}.$$

В качестве измерителя тока в аппарате имеется микроамперметр 10—100—1 000—10 000 *мка*. Пределы измерения переключаются рычажком, находящимся на микроамперметре. Установленная область появляется в окне шкалы. В измерительный прибор встроены дополнительно добавочные сопротивления. Эти сопртивления служат для того, чтобы падение напряжения при предельном отклонении стрелки соответствовало напряжению срабатывания счетчика кулонов. Ток получается от счетчика кулонов. Поэтому прибор на всех пределах измерения защищен от перегрузки.

На рис. 211 показано семейство градуировочных линий такого счетчика кулонов. По абциссе отложено сопротивление, по ординате — время в секундах между двумя вспышками.

Уменьшением емкости C до минимально необходимой для срабатывания реле можно сделать счетчик настолько чувствительным, что между двумя вспышками помещается 1 *мка·сек*.

Рассмотренный аппарат высокого напряжения благодаря применению каскадной схемы имеет почти гиперболическую вольт-амперную характеристику. Первый

конденсатор каскада, расположенный непосредственно за трансформатором высокого напряжения, последовательно с его вторичной обмоткой является единственным действительным реактивным сопротивлением в случае короткого замыкания устройства. С ним вместе действует сопротивление вторичной обмотки, которым обычно можно пренебречь, и ограничивает ток только кон-

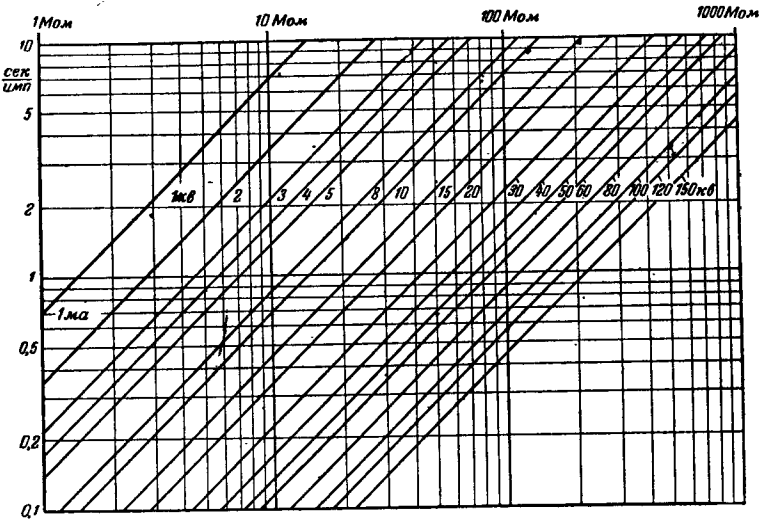


Рис. 211.

денсатор. Из реактивного сопротивления конденсатора $R = \frac{1}{\omega C}$ можно легко определить ток короткого замыкания прибора. Если желают обеспечить ток короткого замыкания 10 *ма* при 10 *кв* в соответствии с толщиной провода вторичной обмотки трансформатора, то нужно применить реактивное сопротивление 1 *Мом*, соответствующее округленно 3 000 *пф*. Напротив, в случае холостого хода устройства имеется максимальное амплитудное напряжение, соответствующее числу ступеней каскада. При десяти ступенях каскада и напряжении на трансформаторе 6 *кв* напряжение получается равным $6 \cdot 10 \sqrt{2} = 84$ *кв*. Правильным выбором числа ступеней и первого конденсатора в каскаде можно установить

крайние значения прибора; к потребителю, подключенному к высоковольтным клеммам прибора, подводится потребляемая с первичной стороны действительная мощность, помноженная на к. п. д. аппарата. Это особый вид аппарата, который при заданной установке может подавать на наружный потребитель постоянную активную мощность независимо от того, насколько высоким может быть его сопротивление. Описанный выше аппарат в области напряжений 40 –2 *кв* в достаточной степени удовлетворяет требованию постоянной выходной мощности 25 *вт*. Такие гиперболические характеристики можно создавать в намного более мощных установках, выполняемых до напряжения 300 *кв*. При зарядке конденсаторов с такой характеристикой сеть никогда не нагружается импульсно и конденсатор заряжается в благоприятных условиях с примерно одинаковым потреблением энергии в единицу времени. Кроме того, одновременно можно счетчик кулонов применять для измерения емкости. Конденсатор емкостью, например, 1 *мкф* при зарядном напряжении 20 *кв* имеет энергию $^1/_2\,CU^2 = 200$ *вт · сек*. Таким образом, описываемый здесь аппарат с постоянной выходной мощностью 25 *вт* требует для зарядки точно 8 *сек*. При этом счетчик кулонов одновременно с измерением емкости регистрирует количество электричества $Q = CU = 20$ *ма · сек*.

2. ИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИСКРОВЫМИ РАЗРЯДНИКАМИ

а) Постановка задачи

Несмотря на все современные измерительные средства, получившие в последние десятилетия значительное распространение, в особенности осциллографы высокого напряжения с большой скоростью записи, в измерительной технике импульсов напряжения и тока по-прежнему удерживаются искровые разрядники как средство измерения. Если благодаря описанным ниже делителям напряжения измеряемое напряжение делится настолько, что ожидаемый пробивной промежуток равен всего нескольким миллиметрам, можно также для очень коротких импульсов до величины порядка 10^{-10} *сек* использовать пробивной промежуток небольшого шарового искрового разрядника для измерения напряжения без большой ошибки.

Измерение кратковременных импульсов напряжения может производиться с большой точностью измерительным искровым разрядником, как это обычно делается в технике высокого напряжения. Однако при малой длительности импульса можно сделать несколько предположений, относящихся к образованию искры. При измерении искровыми разрядниками работают в основном с так называемым полным разрядом.

b) Виды разрядов [Л. 67, 68, 69]

Полные разряды объединяют все взаимосвязанные формы разрядов с падающей характеристикой, в частности дуговой и кистевой разряды и импульсный искровой разряд (полная искра), вероятно, и кратковременный дуговой разряд, образующий прерывистое соединение обоих электродов всегда с падающей характеристикой. Но могут также возникнуть **предварительные разряды**, либо частичная искра, либо кратковременные слабые полные разряды, которые иногда предшествуют полным разрядам.

Часто можно отчетливо проследить за переходом одной формы разряда в другую, особенно когда при этом вследствие падения напряжения наступает автоматическое прерывание тока (ритмические колебания тока и напряжения), так называемые прерывистые разряды (импульсный тлеющий, импульсный кистевой и т. п.). Напряжение и ток, при которых наступает переход в ближайшую высшую форму разряда, называют высшим предельным напряжением или высшим предельным током, или кратко предельным напряжением и предельным током. При переходе в низшую форму разряда получают соответственно нижнее предельное напряжение и нижний предельный ток.

Различают:

a) начальное напряжение как предельное напряжение темного разряда;

b) предельное напряжение тлеющего разряда;

c) предельное напряжение кистевого разряда;

d) предельное напряжение скользящего разряда;

e) предельное напряжение кистевой дуги и соответствующие предельные токи.

Напряжение искрового разряда. Особенно важно, что напряжение образования искры, напряжение искрового

разряда, может совпадать с каждым из этих предельных напряжений. Начальное напряжение рассматривается как напряжение искрового разряда при разряде Таунсенда; здесь напряжение искрового разряда при других формах разряда рассматривается, например, как предельное напряжение кистевого разряда. Для измере-

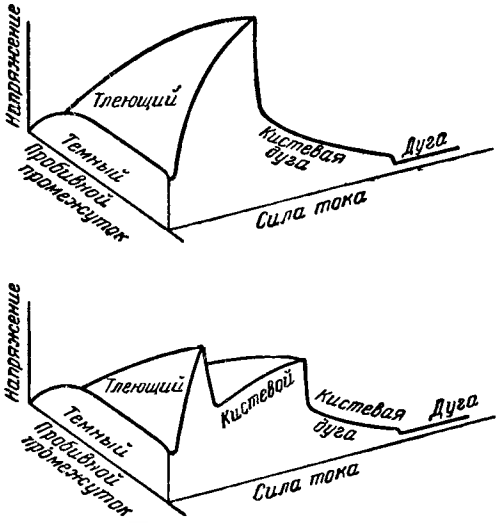


Рис. 212. Характеристические поверхности положительных и отрицательных разрядов между острием и пластиной (по Теплеру).

ний (измерений напряжения и времени) используется только напряжение искрового разряда; для измерительных целей не могут быть использованы другие формы разряда из-за их зависимости от многих факторов и случайностей, а также из-за очень трудного разделения отдельных форм разряда.

Характеристики. Области существования отдельных форм разряда можно представить характеристическими поверхностями. Рисунок 212 показывает их для положительных и отрицательных разрядов (катодное острие — плоский анод и анодное острие — плоский катод). Отчетливо видны скачки напряжения, которые имеют место при переходе разряда из одной формы в другую. Можно

спроектировать характеристические поверхности на три координатные плоскости. Особенно интересна проекция на плоскость пробивной промежуток — напряжение. Рисунок 213 показывает различные предельные напряжения в зависимости от величины пробивного промежутка для одинаковых острых или маленьких шаровых элек-

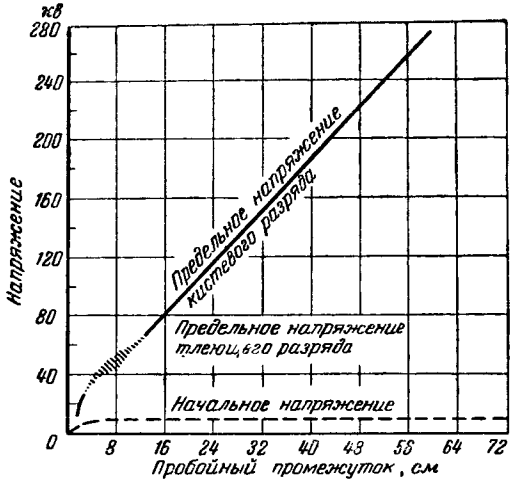


Рис. 213. Формы разряда между двумя остриями (по Теплеру).

тродов. Видно, что напряжение искрового разряда (сильно вытянутая кривая) сначала является начальным напряжением, потом предельным напряжением тлеющего и, наконец, кистевого разряда.

Более тонкое разделение на отдельные формы разряда дает рис. 214, также для двух одинаковых острых электродов с равными противоположными напряжениями (по Теплеру). Всегда отмечалось самое низкое наблюдаемое значение.

Нужно отметить несколько существенных пунктов при измерении очень кратковременных импульсов напряжения искровыми разрядниками:

1. Металл, из которого изготовлены измерительные шары, должен иметь малую работу выхода. Алюминий является подходящим материалом.

2. Разрядное пространство между обоими шарами должно быть подвергнуто либо сильному ультрафиолетовому излучению, либо сильному бета-излучению радиоактивного препарата. В случае, если можно сделать доступным измерительный искровой разрядник, после

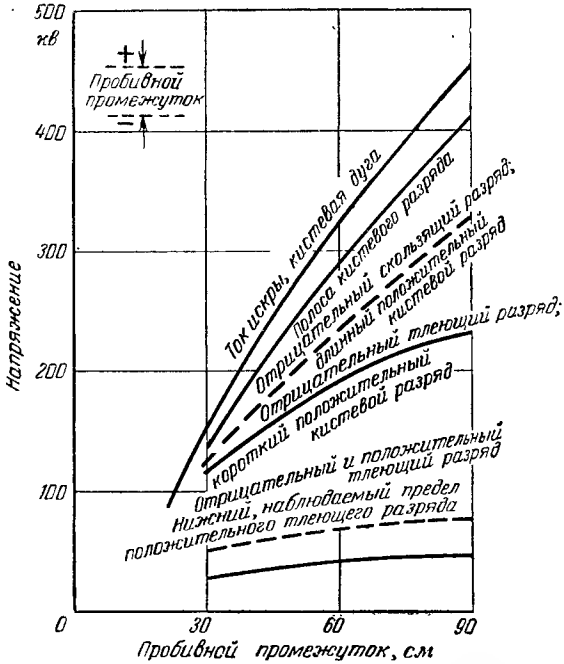


Рис. 214. Более детальное разделение диаграммы рис. 212 (по Теплеру).

каждого пробоя или после длительных пауз можно тонкой наждачной бумагой пошлифовать поверхность алюминия так, чтобы получить активированные поверхности на противолежащих участках шаров. Эта механическая активация действует точно так же, как постоянное ультрафиолетовое или радиоактивное излучение, так как свежие металлические поверхности эмиттируют свободные электроны. Большие измерительные искровые разрядники с большим пробивным промежутком неприменимы, так как развитие ионной лавины требует слишком

много времени, чтобы обеспечить быстрый пробой, соответствующий действительному напряжению. Можно принять приближенно, что при пробивном промежутке 1 *см*, соответствующем импульсному напряжению 31 *кв*, можно еще надежно измерить с точностью 1—2% импульсы со временем существования 10^{-7} *сек*, а при 1 *мм* 10^{-10} *сек*.

Пробивные промежутки шаровых искровых разрядников приведены в табл. 16, 17*. Если действуют импульсами с большой длительностью полуволны, например 1 *мсек*, то можно не обращать внимания на длину пробивного промежутка и оперировать самыми большими промежутками: до 1—2 *м*. Только при очень малых длительностях импульса следует руководствоваться сказанным выше. При длительности импульса 10^{-5} *сек* оказывается допустимым в измерительных искровых разрядниках пробивной промежуток 10 *см*.

Игольчатый искровой разрядник. Искровые игольчатые разрядники для измерения напряжения по точности измерения далеко не достигают точности искровых разрядников, при которых напряжение искрового разряда совпадает с начальным напряжением (шаровой, цилиндрический искровой разрядник). Несмотря на это, они из-за некоторых преимуществ (линейная зависимость между напряжением искрового разряда и длиной пробивного промежутка, малая собственная емкость) находят применение, особенно в Америке, где они даже стандартизованы. Они прежде всего легко собираются и устанавливаются и вследствие отсутствия тяжелых шаров имеют малый вес.

Также может являться преимуществом при измерении сильное различие напряжения искрового разряда при положительной или отрицательной игле по отношению к плоскости

Измерения при низкочастотных напряжениях. Очень обстоятельные исследования применимости искровых игольчатых разрядников провел Вайкер [Л. 68]. Он показал, что форма острия может иметь большое влияние на напряжение искрового разряда. На рис. 215 дано напряжение искрового разряда между одинаковыми остриями в зависимости от угла раскрытия острия

* Из [Л. 67].

Таблица 16

Эталонные напряжения для шаровых искровых разрядников. Начальные напряжения и напряженность поля при пробое для одинаковых шаров в воздухе в случае одного заземленного полюса и при симметричном распределении напряжения на электродах. Действительно для $b = 760$ *мм рт. ст.* и $t = 20°$ C (относительная плотность воздуха $\delta = \frac{b \cdot 293}{760\,(273 + t)} = 1{,}0$)

S, *см*	$D = 2$ *см*					$D = 5$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
0,1	0,05	48,12	4,65	48,12	4,65	0,02	47,17	4,65	47,17	4,65
0,2	0,10	43,40	8,13	43,12	8,08	0,04	41,44	8,03	41,44	8,03
0,3	0,15	42,17	11,44	41,44	11,29	0,06	39,16	11,28	39,16	11,28
0,4	0,20	41,82	14,54	40,97	14,41	0,08	37,98	14,40	37,85	14,35
0,5	0,25	42,22	17,60	40,95	17,45	0,10	37,33	17,47	37,03	17,33
0,6	0,30	43,20	20,68	41,28	20,48	0,12	36,94	20,44	36,53	20,21
0,7	0,35	44,28	23,59	41,61	23,39	0,14	36,69	23,36	36,23	23,16
0,8	0,40	45,34	26,30	41,93	26,15	0,16	36,59	26,25	36,11	26,03
0,9	0,45	46,43	28,90	42,17	28,73	0,18	36,52	29,08	36,06	28,83
1,0	0,50	47,32	31,20	42,41	31,20	0,20	36,69	31,90	36,03	31,70
1,1	0,55	48,21	33,35	42,64	33,50	0,22	36,92	34,71	36,07	34,45
1,2	0,60	48,96	35,28	42,82	35,68	0,24	37,15	37,45	36,16	37,22
1,3	0,65	49,66	36,98	43,00	37,76	0,26	37,45	40,22	36,25	39,93
1,4	0,70	50,35	37,50	43,16	38,31	0,28	37,76	42,97	36,32	42,57

Продолжение табл. 16

S, *см*	$D = 2$ *см*					$D = 5$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
1,5	0,75	50,96	40,03	43,34	41,70	0,30	38,05	45,54	36,43	45,20
1,6	0,80	51,57	41,33	43,47	43,47	0,32	38,33	48,04	36,52	47,70
1,7	0,85	52,13	42,71	43,62	45,20	0,34	38,64	50,48	36,62	50,22
1,8	0,90	52,65	43,84	43,77	46,83	0,36	38,90	52,80	36,71	52,75
1,9	0,95	53,11	44,85	43,87	48,20	0,38	39,17	55,00	36,80	55,10
2,0	1,00	53,52	45,80	43,96	49,70	0,40	39,46	57,25	36,88	57,48
2,5	1,25	55,59	49,98	44,36	55,72	0,50	40,76	67,20	37,23	68,50
3,0	1,5	57,15	52,70	44,61	60,48	0,60	42,02	75,60	37,52	78,20
4,0	2,0	59,70	56,87	44,88	67,08	0,80	44,12	88,63	37,96	94,87
5,0	—	—	—	—	—	1,00	45,71	97,75	38,23	108,0
6,0	—	—	—	—	—	1,20	47,04	104,8	38,41	118,5
7,0	—	—	—	—	—	1,40	48,14	110,2	38,55	127,1
8,0	—	—	—	—	—	1,60	49,03	114,3	38,64	134,3
9,0	—	—	—	—	—	1,80	49,90	117,8	38,70	139,9
10,0	—	—	—	—	—	2,00	50,64	120,7	38,75	144,8
12,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 16

S, *см*	$D = 6{,}25$ *см*					$D = 10$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
0,1	0,016	47,00	4,65	47,00	4,65	0,01	46,89	4,65	46,89	4,65
0,2	0,032	41,20	8,04	41,20	8,04	0,02	40,84	8,05	40,84	8,05
0,3	0,048	38,92	11,29	38,90	11,28	0,03	38,43	11,28	38,43	11,28
0,4	0,064	37,63	14,40	37,58	14,37	0,04	36,97	14,37	36,97	14,37
0,5	0,080	36,83	17,46	36,68	17,38	0,05	36,04	17,43	36,04	17,43
0,6	0,096	36,43	20,53	36,11	20,35	0,06	35,35	20,38	35,35	20,38
0,7	0,112	36,12	23,58	35,71	23,30	0,07	34,88	23,28	34,88	23,28
0,8	0,128	35,91	26,35	35,47	25,98	0,08	34,58	26,20	34,51	26,17
0,9	0,144	35,77	29,25	35,29	28,90	0,09	34,38	29,13	34,24	29,02
1,0	0,160	35,69	32,00	35,19	31,70	0,10	34,24	32,05	34,05	31,88
1,1	0,176	35,65	34,75	35,12	34,50	0,11	34,16	34,91	33,88	34,62
1,2	0,192	35,73	37,56	35,11	37,26	0,12	34,09	37,77	33,77	37,40
1,3	0,208	35,88	40,29	35,16	40,00	0,13	34,06	40,60	33,68	40,20
1,4	0,224	36,06	43,04	35,21	42,74	0,14	34,04	43,40	33,61	43,00
1,5	0,240	36,27	45,72	35,29	45,44	0,15	34,06	46,18	33,58	45,72
1,6	0,256	36,51	48,45	35,36	48,12	0,16	34,12	48,98	33,57	48,38
1,7	0,272	36,76	51,10	35,42	50,77	0,17	34,20	50,86	33,58	50,20
1,8	0,288	36,97	53,60	35,48	53,25	0,18	34,29	54,52	33,59	53,78
1,9	0,304	37,20	56,11	35,56	55,80	0,19	34,40	57,35	33,61	56,51

Продолжение табл. 16

S, *см*	$D = 6{,}25$ *см*					$D = 10$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
2,0	0,32	37,41	58,64	36,64	58,38	0,20	34,51	60,10	33,65	59,20
2,5	0,40	38,53	69,92	35,99	70,10	0,25	35,08	73,10	33,89	72,20
3,0	0,48	39,54	79,70	36,22	80,85	0,30	35,67	85,40	34,03	84,50
4,0	0,64	41,29	95,60	36,59	99,45	0,40	36,92	107,2	34,35	107,1
5,0	0,80	42,73	107,3	36,88	115,2	0,50	37,91	125,0	34,56	127,0
6,0	0,96	43,93	116,2	37,06	128,2	0,60	38,85	139,8	34,72	144,7
7,0	1,12	44,95	123,2	37,18	138,9	0,70	39,65	152,0	34,85	160,5
8,0	1,28	45,87	128,8	37,28	148,0	0,80	40,36	162,0	34,97	174,7
9,0	1,44	46,71	133,8	37,35	155,7	0,90	40,98	170,7	35,07	187,6
10,0	1,60	47,34	137,6	37,41	162,3	1,0	41,55	177,7	35,14	198,5
12,0	1,92	48,58	143,8	37,49	173,0	1,2	42,59	189,8	35,26	217,4
14,0	—	—	—	—	—	1,4	43,45	199,5	35,34	233,0
15,0	—	—	—	—	—	1,5	43,82	202,2	35,37	239,5
16,0	—	—	—	—	—	1,6	44,18	206,1	35,39	245,7
18,0	—	—	—	—	—	1,8	44,82	210,8	35,42	256,0
20,0	—	—	—	—	—	2,0	45,39	216,1	35,44	264,8

Продолжение табл. 16

S, *см*	$D = 12{,}5$ *см*					$D = 15$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
0,1	0,008	46,70	4,65	46,70	4,65	0,0066	46,62	4,64	46,62	4,64
0,5	0,04	35,90	17,46	35,90	17,46	0,0333	35,70	17,48	35,70	17,48
1,0	0,08	33,83	32,07	33,74	32,00	0,066	33,53	32,08	33,49	32,02
1,5	0,12	33,36	46,62	33,07	46,23	0,100	32,94	46,27	32,69	45,90
2,0	0,16	33,42	59,96	32,92	59,37	0,133	32,79	60,00	32,46	59,84
2,5	0,20	33,77	73,40	32,99	72,58	0,166	33,00	73,67	32,43	72,70
3,0	0,24	34,20	86,22	33,13	85,40	0,200	33,31	86,94	32,50	85,82
4,0	0,32	35,11	110,1	33,43	109,4	0,266	34,00	111,80	32,73	110,4
5,0	0,40	36,06	130,8	33,64	131,2	0,333	34,70	134,10	32,95	133,4
6,0	0,48	36,86	148,5	33,80	150,9	0,400	35,46	154,3	33,09	154,7
7,0	0,56	37,62	164,0	33,93	168,6	0,466	36,14	172,1	33,21	174,1
8,0	0,64	38,25	177,2	34,03	184,9	0,533	36,81	188,3	33,31	192,0
9,0	0,72	38,84	188,0	34,11	200,0	0,600	37,37	202,0	33,40	208,6
10,0	0,80	39,37	197,7	34,18	213,6	0,666	37,86	213,8	33,47	224,3
12,0	0,96	40,30	213,6	34,28	237,0	0,800	38,77	233,3	33,57	251,7
14,0	1,12	41,05	225,0	34,35	257,0	0,933	39,53	249,3	33,64	275,0
15,0	1,20	41,45	230,3	34,38	265,5	1,000	39,85	255,8	33,67	285,2
16,0	1,28	41,78	235,0	34,41	273,3	1,066	40,18	262,4	33,69	294,5
18,0	1,44	42,39	242,8	34,45	287,2	1,200	40,71	272,4	33,73	312,2
20,0	1,60	42,92	249,6	34,48	299,4	1,330	41,19	280,7	33,77	327,0
25,0	2,0	44,01	262,0	34,53	322,4	1,660	42,17	296,1	33,83	357,7
30,0	—	—	—	—	—	2,000	43,05	307,5	33,89	379,7

Продолжение табл. 16

S, *см*	$D = 25$ *см*					$D = 50$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
0,5	0,02	35,56	17,53	35,56	17,53	0,01	35,42	17,58	35,42	17,58
1,0	0,04	33,05	32,15	33,05	32,15	0,02	32,82	32,35	32,82	32,35
1,5	0,06	32,14	46,30	32,08	46,20	0,03	31,62	46,50	31,62	46,50
2,0	0,08	31,72	60,18	31,59	59,90	0,04	30,97	60,13	30,97	60,13
2,5	0,10	31,51	73,80	31,36	73,45	0,05	30,58	71,00	30,58	71,00
3,0	0,12	31,48	87,18	31,23	86,70	0,06	30,35	87,50	30,31	87,40
4,0	0,16	31,70	113,8	31,21	112,5	0,08	30,12	114,2	30,01	113,8
5,0	0,20	32,06	139,3	31,31	137,7	0,10	30,06	140,7	29,84	139,7
6,0	0,24	32,47	163,6	31,45	161,8	0,12	30,07	166,3	29,79	164,8
7,0	0,28	32,89	187,1	31,53	184,7	0,14	30,16	192,0	29,80	190,5
8,0	0,32	33,30	208,2	31,65	206,7	0,16	30,28	217,2	29,85	215,1
9,0	0,36	33,72	228,9	31,74	227,7	0,18	30,43	242,3	29,90	239,0
10,0	0,40	34,10	247,2	31,82	248,0	0,20	30,58	265,8	29,95	263,4
12,0	0,48	34,87	281,0	31,92	284,8	0,24	30,97	312,3	30,05	309,4
14,0	0,56	35,49	309,6	32,00	317,7	0,28	31,37	357,0	30,11	352,8
15,0	0,60	35,77	322,3	32,03	333,7	0,30	31,55	377,4	30,13	374,0
16,0	0,64	36,02	333,4	32,06	348,8	0,32	31,73	397,6	30,16	394,0
18,0	0,72	36,52	353,7	32,11	377,5	0,36	32,12	436,0	30,21	433,8
20,0	0,80	36,95	370,4	32,16	401,8	0,40	32,51	471,7	30,26	471,5
25,0	1,00	37,89	405,2	32,23	455,4	0,50	33,34	549,6	30,37	558,5
30,0	1,20	38,65	431,0	32,29	498,0	0,60	34,04	612,0	30,47	634,5

Продолжение табл. 16

S, *см*	$D = 25$ *см*					$D = 50$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
35,0	1,40	39,28	451,0	32,30	532,0	0,70	34,62	664,2	30,55	703,7
40,0	1,60	39,81	464,3	32,31	560,7	0,80	35,12	706,0	30,60	765,0
50,0	2,00	40.69	484,3	32,32	604,0	1,0	35,94	769,0	30,65	865,7
60,0	—	—	—	—	—	1,2	36,64	817,0	30,69	947,0
70,0	—	—	—	—	—	1,4	37,24	852,5	30,71	1 013
80,0	—	—	—	—	—	1,6	37,71	879,8	30,71	1 068
90,0	—	—	—	—	—	1,8	38,18	902,0	30,72	1 112
100,0	—	—	—	—	—	2,0	38,57	918,0	30,73	1 148
	$D = 75$ *см*					$D = 100$ *см*				
0,5	0,0066	35,38	17,58	35,38	17,58	0,005	35,36	17,59	35,36	17,59
1,0	0,0133	32,75	32,44	32,75	32,44	0,010	32,67	32,38	32,67	32,38
1,5	0,0200	31,52	46,60	31,52	46,60	0,015	31,42	46,20	31,42	46,20
2,0	0,0266	30,80	60,50	30,80	60,50	0,020	30,71	60,54	30,71	60,54
2,5	0,0330	30,37	74,20	30,37	74,20	0,025	30,29	74,40	30,29	74,40
3,0	0,0400	30,06	87,73	30,06	87,73	0,030	29,95	88,00	29,95	88,00
4,0	0,0533	29,71	113,5	29,67	113,3	0,040	29,54	114,8	29,54	114,8
5,0	0,0660	29,55	141,3	29,45	140,8	0,050	29,30	141,7	29,30	141,7
6,0	0,0800	29,46	167,5	29,32	166,8	0,060	29,17	168,1	29,14	168,0
7,0	0,0933	29,44	193,7	29,24	192,4	0,070	29,11	194,3	29,03	193,8
8,0	0,1066	29,43	219,2	29,19	217,3	0,080	29,06	220,3	28,97	219,7

S, *см*	$D = 75$ *см*					$D = 100$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
9,0	0,1200	29,45	244,7	29,17	242,3	0,090	29,05	246,2	28,92	245,1
10,0	0,1330	29,50	270,0	29,18	267,2	0,10	29,04	272,0	28,88	270,4
12,0	0,1600	29,69	319,5	29,21	315,8	0,12	29,05	322,0	28,84	319,6
14,0	0,1866	29,91	368,0	29,28	363,2	0,14	29,14	371,6	28,85	369,0
15,0	0,2000	30,01	391,5	29,32	387,0	0,15	29,19	395,8	28,85	393,0
16,0	0,2133	30,14	414,7	29,35	409,0	0,16	29,26	420,0	28,86	416,0
18,0	0,240	30,36	459,0	29,40	454,3	0,18	29,41	468,0	28,91	463,0
20,0	0,266	30,61	503,0	29,44	496,5	0,20	29,58	514,3	28,95	509,2
25,0	0,333	31,22	603,2	29,53	598,0	0,25	30,03	626,0	29,03	618,7
30,0	0,400	31,83	693,0	29,61	692,3	0,30	30,47	729,2	29,09	722,4
35,0	0,466	32,38	771,0	29,68	778,3	0,35	30,94	825,0	29,13	819,2
40,0	0,533	32,85	840,0	29,72	857,0	0,40	31,41	912,3	29,17	909,0
50,0	0,666	33,63	950,0	29,79	998,0	0,50	32,16	1 060	29,24	1 075
60,0	0,800	34,29	1 031	29,85	1 120	0,60	32,78	1 181	29,29	1 221
70,0	0,933	34,82	1 098	29,88	1 220	0,70	33,30	1 277	29,32	1 350
80,0	1,066	35,26	1 151	29,90	1 307	0,80	33,77	1 355	29,34	1 467
90,0	1,200	35,69	1 193	29,92	1 394	0,90	34,17	1 423	29,36	1 570
100,0	1,333	36,07	1 228	29,93	1 449	1,00	34,58	1 478	29,38	1 659
110,0	1,466	36,39	1 258	29,93	1 508	1,10	34,83	1 526	29,38	1 737
120,0	1,60	36,68	1 284	29,93	1 559	1,20	35,13	1 566	29,39	1 813
150,0	2,0	37,41	1 336	29,94	1 678	1,50	35,87	1 655	29,41	1 993
200,0	—	—	—	—	—	2,0	36,81	1 753	29,43	2 198

Продолжение табл. 16

S, *см*	$D = 150$ *см*					$D = 200$ *см*				
	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
5	0,0333	29,04	141,8	29,04	141,8	0,025	28,92	142,5	28,92	142,5
10	0,0666	28,54	273,0	28,52	272,8	0,050	28,31	273,8	28,30	273,8
15	0,100	28,50	400,3	28,39	398,6	0,075	28,21	402,8	28,13	401,5
20	0,133	28,60	523,4	28,37	520,0	0,100	28,20	528,4	28,07	525,6
25	0,166	28,84	642,0	28,39	636,5	0,125	28,25	650,0	28,06	645,5
30	0,200	29,09	759,0	28,43	751,0	0,150	28,38	770,0	28,07	765,0
35	0,233	29,36	870,5	28,46	858,5	0,175	28,54	887,4	28,09	878,0
40	0,266	29,65	975,0	28,51	962,0	0,20	28,75	1 000	28,10	989,0
50	0,333	30,29	1 170	28,58	1 157	0,25	29,17	1 215	28,13	1 199
60	0,400	30,88	1 344	28,62	1 338	0,30	29,60	1 417	28,16	1 397
70	0,466	31,38	1 494	28,64	1 502	0,35	30,06	1 602	28,18	1 584
80	0,533	31,79	1 626	28,66	1 651	0,40	30,51	1 770	28,21	1 760
90	0,600	32,18	1 738	28,68	1 792	0,45	30,90	1 922	28,24	1 925
100	0,666	32,51	1 837	28,70	1 922	0,50	31,24	2 060	28,25	2 078
110	0,733	32,83	1 920	28,71	2 044	0,55	31,56	2 182	28,26	2 220
120	0,800	33,14	1 995	28,71	2 152	0,60	31,83	2 293	28,27	2 354
150	1,00	33,88	2 173	28,73	2 435	0,75	32,55	2 558	28,29	2 725
200	1,33	34,83	2 373	28,75	2 785	1,00	33,48	2 863	28,32	3 200
250	1,66	35,52	2 496	28,75	3 040	1,25	34,20	3 075	28,34	3 560
300	2,00	36,10	2 579	28,76	3 222	1,50	34,78	3 155	28,35	3 840
350	—	—	—	—	—	1,75	35,25	3 322	28,36	4 067
400	—	—	—	—	—	2,0	35,67	3 397	28,37	4 240

Таблица 17

Эталонные напряжения для маленьких шаровых искровых разрядников. Начальные напряжения и напряженность поля при пробое для одинаковых шаров в воздухе в случае одного заземленного полюса и при симметричном распределении напряжения на электродах. Действительно при $b = 760$ *мм рт. ст.* и $t = 20°$ С

$$\left(\text{относительная плотность воздуха } \delta = \frac{b \cdot 273}{760\,(273 + t)} = 1{,}0\right)$$

S, *см*	$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		$\frac{S}{D}$	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
		$D = 0{,}5$ *см*					$D = 1{,}0$ *см*			
0,01	0,02	107,4	1,06	107,4	1,06	0,01	103,8	1,03	103,8	1,03
0,02	0,04	80,54	1,56	80,54	1,56	0,02	78,34	1,54	78,34	1,54
0,03	0,06	70,16	2,02	70,15	2,02	0,03	68,08	2,00	68,08	2,00
0,04	0,08	64,64	2,45	64,64	2,45	0,04	62,37	2,43	62,37	2,43
0,05	0,10	61,66	2,89	61,45	2,87	0,05	58,48	2,82	58,48	2,82
0,06	0,12	59,70	3,31	59,29	3,29	0,06	55,98	3,22	55,98	3,22
0,07	0,14	58,21	3,71	57,68	3,69	0,07	54,10	3,61	54,10	3,61
0,08	0,16	57,15	4,10	56,49	4,07	0,08	52,78	4,01	52,70	3,99
0,09	0,18	56,36	4,48	55,65	4,45	0,09	51,64	4,38	51,55	4,37
0,1	0,2	55,85	4,85	55,02	4,83	0,1	50,74	4,75	50,64	4,74
0,2	0,4	59,70	8,65	55,21	8,60	0,2	48,03	8,34	47,04	8,28
0,3	0,6	65,46	10,75	57,02	11,88	0,3	48,87	11,70	46,94	11,65
0,4	0,8	69,50	13,96	58,21	14,55	0,4	51,46	14,90	47,73	14,85
0,5	1,0	72,94	15,37	58,99	16,65	0,5	54,01	17,80	48,42	17,80
0,6	1,2	75,68	16,90	59,57	18,40	0,6	56,10	20,15	48,98	20,40

Продолжение табл. 17

S, см	S/D	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		S/D	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, кв/см	$U_{макс}$, кв	E, кв/см	$U_{макс}$, кв		E, кв/см	$U_{макс}$, кв	E, кв/см	$U_{макс}$, кв
0,7	1,4	78,34	17,95	60,02	19,78	0,7	57,74	22,13	49,49	22,80
0,8	1,6	80,54	18,78	60,39	20,90	0,8	59,36	23,85	49,91	24,94
0,9	1,8	82,80	19,50	60,72	21,94	0,9	60,74	25,30	50,27	26,87
1,0	2,0	84,72	20,15	60,98	22,80	1,0	61,87	26,50	50,52	28,50
1,5	—	—	—	—	—	1,5	66,60	30,90	51,38	34,80
2,0	—	—	—	—	—	2,0	70,39	33,50	51,93	38,80
		$D = 1,5$ см					$D = 2,5$ см			
0,01	0,0066	101,9	1,01	101,9	1,01	0,004	99,90	0,995	99,90	0,995
0,02	0,0133	76,74	1,52	76,74	1,52	0,008	75,25	1,49	75,25	1,49
0,03	0,0200	66,83	1,97	66,83	1,97	0,012	65,69	1,95	65,69	1,95
0,04	0,0266	61,02	2,40	61,02	2,40	0,016	60,12	2,38	60,12	2,38
0,05	0,0333	57,28	2,80	57,28	2,80	0,020	56,43	2,77	56,43	2,77
0,06	0,0400	54,70	3,19	54,70	3,19	0,024	53,76	3,17	53,76	3,17
0,07	0,0466	52,76	3,58	52,76	3,58	0,028	51,70	3,55	51,70	3,55
0,08	0,0533	51,23	3,95	51,23	3,95	0,032	50,12	3,93	50,12	3,93
0,09	0,0600	50,00	4,31	50,00	4,31	0,036	48,81	4,27	48,81	4,27
0,1	0,0666	49,09	4,70	49,09	4,70	0,04	47,70	4,64	47,70	4,64
0,2	0,133	44,98	8,23	44,46	8,15	0,08	42,49	8,06	42,35	8,04
0,3	0,200	44,16	11,50	43,27	11,40	0,12	40,90	11,35	40,49	11,24
0,4	0,266	44,60	14,65	43,13	14,56	0,16	40,27	14,42	39,63	14,30
0,5	0,333	45,97	17,75	43,57	17,63	0,20	40,18	17,44	39,37	17,30
0,6	0,400	47,70	20,70	44,06	20,58	0,24	40,41	20,37	39,38	20,30

Продолжение табл. 17

S, *см*	S/D	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		S/D	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
0,7	0,466	49,18	23,26	44,46	23,30	0,28	41,11	23,34	39,55	23,20
0,8	0,533	50,47	25,77	44,84	25,90	0,32	41,86	26,20	39,77	25,98
0,9	0,600	51,64	27,86	45,10	28,10	0,36	42,66	28,90	40,01	28,60
1,0	0,666	52,72	29,75	45,39	30,40	0,40	43,40	31,40	40,23	31,30
1,5	1,000	56,75	36,50	46,34	39,20	0,60	46,61	41,90	41,17	42,80
2,0	1,333	59,57	40,70	46,88	45,50	0,80	49,09	49,20	41,84	52,35
2,5	1,666	61,80	43,40	47,24	50,00	1,0	50,99	53,70	42,30	59,75
3,0	2,000	63,75	45,50	47,53	53,30	1,2	52,48	58,50	42,58	65,70
3,5	—	—	—	—	—	1,4	53,76	61,70	42,78	70,60
4,0	—	—	—	—	—	1,6	54,89	64,00	42,93	74,50
4,5	—	—	—	—	—	1,8	55,91	66,00	43,50	77,80
5,0	—	—	—	—	—	2,0	56,75	67,55	43,15	80,60
		$D=3,0$ *см*					$D=4,0$ *см*			
0,01	0,0033	99,14	0,988	99,14	0,988	0,0025	98,24	0,98	98,24	0,98
0,02	0,0066	75,16	1,49	75,16	1,49	0,0050	74,13	1,47	74,13	1,47
0,03	0,0100	65,12	1,94	65,12	1,94	0,0075	64,94	1,93	64,94	1,93
0,04	0,0133	59,74	2,36	59,74	2,36	0,0100	59,64	2,36	59,64	2,36
0,05	0,0166	56,24	2,77	56,24	2,77	0,0125	56,01	2,77	56,01	2,77
0,06	0,0200	53,69	3,17	53,69	3,17	0,0150	53,33	3,16	53,33	3,16
0,07	0,0233	51,49	3,55	51,49	3,55	0,0175	51,29	3,54	51,29	3,54
0,08	0,0266	49,87	3,93	49,87	3,93	0,0200	49,66	3,91	49,66	3,91

Продолжение табл. 17

S, *см*	S/D	Один шар заземлен		Симметричное напряжение		S/D	Один шар заземлен		Симметричное напряжение	
		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*		E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*	E, *кв/см*	$U_{макс}$, *кв*
0,09	0,0300	48,60	4,27	48,60	4,27	0,0225	48,36	4,28	48,36	4,28
0,1	0,033	47,50	4,64	47,50	4,64	0,025	47,32	4,65	47,32	4,65
0,2	0,066	42,09	8,06	42,09	8,06	0,050	41,74	8,08	41,74	8,08
0,3	0,100	40,23	11,20	40,00	11,24	0,075	39,49	11,27	39,49	11,27
0,4	0,133	39,47	14,44	38,95	14,28	0,100	38,40	14,38	38,24	14,33
0,5	0,166	39,16	17,45	38,48	17,24	0,125	37,88	17,42	37,54	17,28
0,6	0,200	39,04	20,34	38,30	20,20	0,150	37,63	20,40	37,17	20,25
0,7	0,233	39,26	23,25	38,34	23,10	0,175	37,50	23,28	37,03	23,15
0,8	0,266	39,73	26,10	38,46	25,90	0,200	37,58	26,10	36,98	26,00
0,9	0,300	40,23	28,90	38,71	28,75	0,225	37,84	28,95	37,03	28,85
1,0	0,333	40,88	31,70	38,92	31,50	0,250	38,18	31,78	37,12	31,60
1,5	0,500	43,85	43,35	39,72	43,75	0,375	40,13	44,70	37,80	44,80
2,0	0,666	46,00	52,00	40,25	54,00	0,500	42,01	55,35	38,28	56,30
2,5	0,833	47,82	58,35	40,66	62,50	0,625	43,65	64,00	38,65	66,25
3,0	1,00	49,32	63,35	40,97	69,40	0,750	44,98	70,75	38,95	74,80
3,5	1,16	50,49	67,25	41,19	75,20	0,875	46,18	76,20	39,25	82,60
4,0	1,33	51,55	70,40	41,36	80,20	1,000	47,15	80,75	39,44	89,20
4,5	1,50	52,54	73,20	41,50	84,30	1,125	48,08	84,65	39,55	94,70
5,0	1,66	53,40	75,00	41,61	87,90	1,25	48,87	87,90	39,66	99,75
6,0	2,00	54,89	78,40	41,81	93,80	1,50	50,27	92,95	39,81	107,8
7,0	—	—	—	—	—	1,75	51,40	97,00	39,90	114,3
8,0	—	—	—	—	—	2,00	52,42	99,75	39,95	119,5

(двойной угол между наружной поверхностью и осью) при постоянном пробивном промежутке 25 *см* (переменное напряжение 50 *гц*). Внутри известной области искровое напряжение не зависит от угла раскрытия, поэтому Вайкер рекомендовал острия с углом раскрытия от 25 до 40° (передний конец несколько спилен из-за

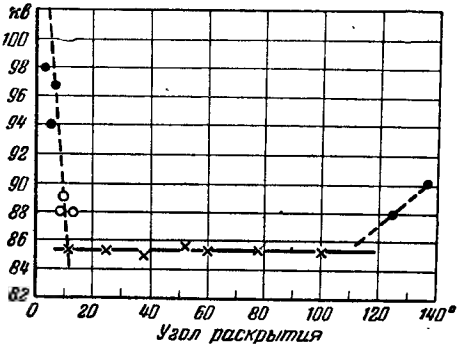


Рис. 215. Эффективное искровое напряжение между двумя остриями в зависимости от угла раскрытия при длине пробивного промежутка 25 *см* по Вайкеру. Возникновение искры связано с образованием скользящего кистевого, тлеющего или несовершенного кистевого разряда.

искрового износа). Но часто используют очень малый угол (главным образом швейные иглы; американские нормы: швейные иглы № 00).

Вследствие ненадежной области перехода напряжения искрового разряда от напряжения тлеющего к напряжению кистевого разряда (рис. 212) Вайкер рекомендует проводить измерения только при пробивном промежутке $S>20$ *см* (напряжение искрового разряда более 85 *кв*, максимально 100 *кв*). В этой области можно использовать следующий линейный закон:

$$U_{\text{действ.}} = 30 + (S-6)(2{,}8+0{,}06\,q),$$

действительный для 740 *мм рт. ст.* и 20° С; здесь S — пробивной промежуток, *см*; q — абсолютная влажность, *г/м*³. Линейность напряжения искрового разряда с пробивным промежутком была позднее найдена Пи-

ком [Л. 69]. Она подтвердилась и для наивысших напряжений в форме простейшего линейного закона

$$U=a+bS.$$

Линейный прирост напряжения составляет от 3,6 до 4 *кв* на 1 *см*.

На рис. 216 приведены важнейшие измерения на одинаковых остриях и для острия против заземленной пластины. При малых напряжениях измерения согласуются, при больших — измерения по Пику дают дальнейшую линейную зависимость; в то же время Кароллу и Козенсу, начиная с 1 700 *кв*, установлено медленное возрастание напряжения искрового разряда с ростом пробивного промежутка. Для линейной зависимости по рис. 216 подходит формула

$$U_{\text{макс}}=20+5{,}11\ S,\ кв.$$

По нанесенным там же измерениям Рота при одинаковых остриях имеется также разница в напряжении искрового разряда при симметричном делении напряжения и заземленном полюсе; при первом расположении оно на 4—5% ниже, чем при втором. Пространственное положение остриев также может оказывать значительное влияние, особенно при больших пробивных промежутках. Для сравнения с рис. 216 на рис. 217 и в табл. 18 дана кривая по американским нормам для одинаковых остриев (температура 25° С).

Таблица 18

Напряжение искрового разряда между острием и пластиной

Американские нормы

Расстояние, *мм*	$U_{\text{действ}}$, *кв*	$U_{\text{макс}}$, *кв*	Расстояние, *мм*	$U_{\text{действ}}$, *кв*	$U_{\text{макс}}$, *кв*
11,9	10	14,14	51,0	35	49,5
18,4	15	21,24	62,0	40	56,6
25,4	20	28,30	75,0	45	63,7
33,0	25	35,35	90,0	50	70,7
41,0	30	42,4			

Напряжение искрового разряда отнесено к t=25° С, давлению 760 *мм рт. ст.* и относительной влажности 80%. Один из полюсов заземлен или не заземлен.

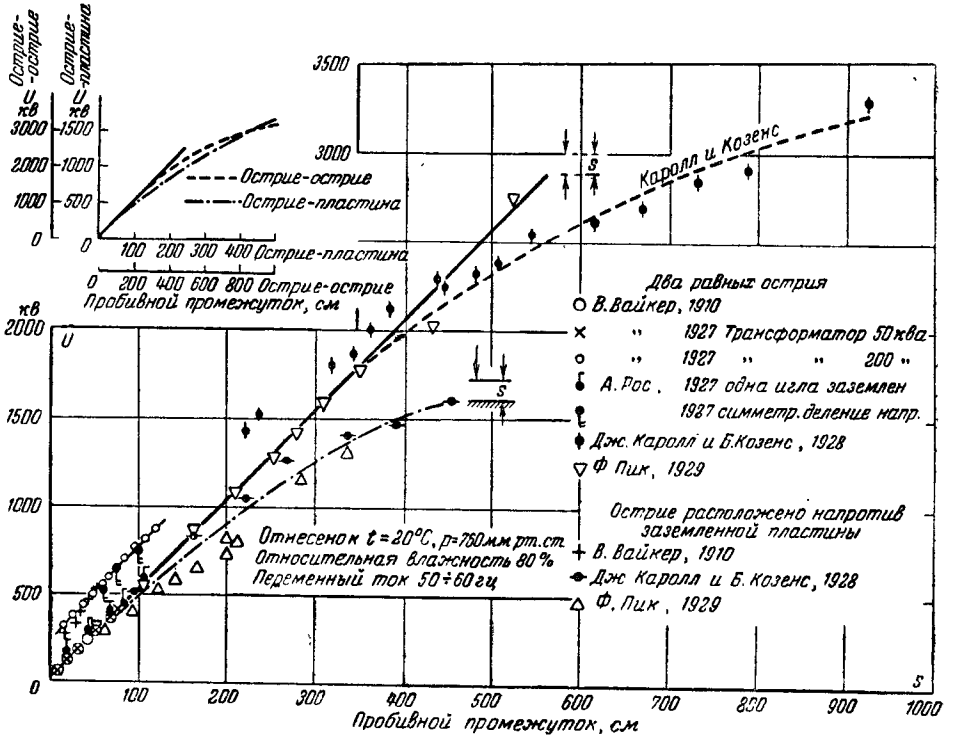


Рис. 216. Напряжение и пробивной промежуток при искровых разрядниках с острыми электродами для очень высоких напряжений (до 3,5 *Мв*) по данным различных авторов.

c) Искровой разрядник острие — пластина

Напряжение искрового разряда при расположении острия против пластины (рис. 217) ниже, чем при острие против острия (50—60 *гц*). Если сравнить напряжение искрового разряда U и пробивной промежуток S для острия против заземленной пластины с $2U$ и $2S$ для двух одинаковых остриев при симметричном делении напряжения (рис. 216, слева вверху), что отвечает картине поля, то не видно совпадения обеих характеристик; при потенциале относительно земли до 1 400 *кв* напряжение искрового разряда при симметричной конструкции выше, чем при несимметричной, что имеет место также при шаровых и цилиндрических разрядниках.

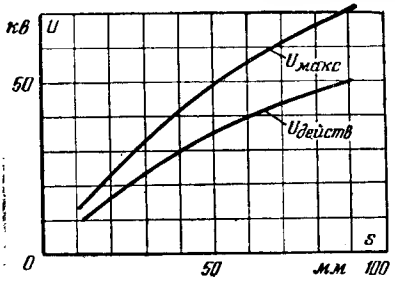


Рис. 217. Американские стандартные калибровочные кривые для пробивного промежутка между острием и пластиной.

Измерения при постоянном напряжении. При постоянном напряжении при одинаковых остриях имеет место такое же напряжение искрового разряда, как при низкочастотном переменном напряжении. Для острия против пластины, наоборот, проявляется очень значительный эффект полярности. На рис. 218 приведены измерения по Марксу; при отрицательном острие напряжение искрового разряда выше, чем при положительном (при больших пробивных промежутках это различие больше, чем при малых). Различие грубо можно объяснить тем, что в одном случае положительный пространственный заряд, всегда расположенный перед острием в очень сильном поле, ослабляет остальное поле (положительная пластина), но усиливает его в противоположном случае (отрицательная пластина).

Большое полярное различие для некоторых измерительных целей может представлять преимущества. В качестве примера можно назвать измерение напряжений на рентгеновской трубке. К рентгеновской трубке с накаленным катодом приложено переменное напряжение.

Разряд через трубку происходит только в течение одного полупериода переменного напряжения; таким образом, также только в течение одного полупериода нагружен трансформатор. Поэтому параллельно включенный шаровой искровой разрядник показывает более высокое напряжение, чем действительное рабочее напряжение трубки, так как он поджигается в ненагруженный полупериод. Если в противоположность этому включают искровой разрядник (типа острие против заземленной пластины) параллельно трубке таким образом, чтобы были связаны (заземлены) пластина и накальный катод, то пробивной промежуток покажет измеряемое рабочее напряжение на трубке, потому что в другой полупериод может произойти зажигание лишь при превышении на 100% этого напряжения. При импульсах с «хвостом», который следует за главным импульсом противоположной полярности, применяется подобная методика измерений.

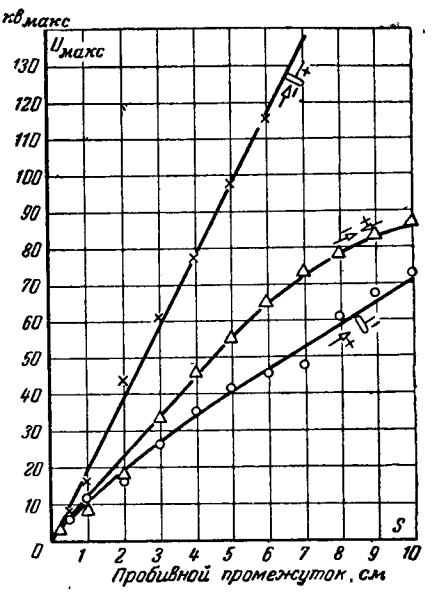


Рис. 218. Пробивной промежуток при разных полярностях электродов (игла — игла, игла — пластина).

d) Измерения высокочастотных и импульсных напряжений

При высокой частоте (до 25 000 *гц*) получают, настраивая на исчезновение искры, приблизительно такое же значение, как при низкой частоте. Напряжение искрового разряда при импульсах напряжения различных формы и полярности будет описано в следующем параграфе.

e) Влияние плотности и влажности воздуха

Напряжение искрового разряда возрастает более чем пропорционально плотности: при повышении давления на 10 *мм рт. ст.* — на 2,4%, при снижении температуры на 5° С при постоянной абсолютной влажности — на 1,9% вблизи 760 *мм рт. ст.* и 20° С. При равной относительной влажности напряжение искрового разряда повышается

Таблица 19

Влияние влажности воздуха на пробивной промежуток

Относительная влажность *r*, %	Пробивной промежуток *S*, *см*		
	50	30	10
	Уменьшение искрового напряжения, %		
60	7,8	7,2	5,6
40	11,8	10,6	8,2
0	15,4	13,6	9,2

или снижается, как температура. Влажность воздуха оказывает очень большое влияние, зависящее также от величины пробивного промежутка. При постоянной плотности воздуха напряжение искрового разряда повышается вместе с относительной влажностью *r* (примерно линейно при больших *r*). Данные рис. 216 действительны для $r=80\%$. Напряжение искрового разряда становится меньше при уменьшении *r* (табл. 19).

f) Искровой игольчатый разрядник для измерения времени

Обзор. Импульсное отношение. Игольчатые искровые разрядники более важны для измерения времени, чем для измерения напряжений, а именно: для измерения длительности и формы приложенного напряжения (импульсного напряжения). Уже указывалось, что для пробоя разрядного промежутка приложенное к электродам на краткое время напряжение должно быть более высоким, чем при длительно приложенном напряжении (статическом напряжении). Пока наблюдается только начальное напряжение и электроды изготовлены такими, что напряжение искрового разряда совпадает с началь-

ным напряжением (большие шары, плоскости), «перенапряжение» при времени примерно до 10^{-9} *сек* при известных условиях очень незначительно или вообще равно нулю.

Если в противоположность этому напряжение искрового разряда совпадает, как при игольчатых электродах, с одной из последующих форм разряда (предельное напряжение тлеющего, кистевого или скользящего разряда), то естественно возникают намного большие перенапряжения, так как время для образования развивающихся разрядных форм совпадает со временем образования разряда Таунсенда. Вместо перенапряжения можно ввести термин «импульсное отношение», т. е. отношение максимального значения напряжения импульсного искрового разряда к статическому (низкочастотному) напряжению искрового разряда. Импульсное отношение для больших шаров и плоскостей приблизительно равно 1. По измерениям Пика [Л. 69] для игольчатых электродов импульсное отношение получается бо́льшим 1 и отличается по форме (передний фронт, пик и задний фронт волны), длительности и полярности кривой напряжения, напротив, при постоянных форме, длительности и полярности кривая напряжения почти не зависит от пробивного промежутка. Если обозначить импульсное отношение β, максимальное импульсное напряжение U и при том же пробивном промежутке соответствующее напряжение искрового разряда при низкой частоте или постоянном напряжении U_0, то

$$\beta = \frac{U}{U_0}.$$

Измерение импульсных отношений для различных форм, длительности и полярности бегущей волны было среди других исследователей проведено Пиком [Л. 69]. Импульсное отношение β зависит главным образом от трех факторов: формы, длительности и полярности волны.

g) Влияние формы и длительности бегущей волны

По Пику [Л. 69] лучше всего практически различают три формы волны: приблизительно экспоненциально возрастающие волны с падающим задним фронтом (наи-

более частая форма), примерно прямоугольные волны с очень коротким временем переднего фронта и линейно возрастающие волны. Для характеристики длительности экспоненциально возрастающих волн достаточно задать время возрастания (от нуля до максимального значения) напряжения (передний фронт волны) и время спада заднего фронта до определенного процента (например, 50%) максимального значения (длина волны); при прямоугольных и линейно возрастающих волнах длительность волны задается временем от начала возрастания до прекращения волны (пробой).

Запаздыванием называют вообще время от достижения статического (низкочастотного) напряжения (U_0) до пробоя; так как последний всегда имеет место при напряжении $\geqslant U_0$, запаздывание — это время до пробоя, в течение которого напряжение волны больше статического напряжения искрового разряда U_0. Искровой пробой при экспоненциально возрастающих волнах следует на заднем фронте, длина которого (наклон), таким образом, оказывает влияние на импульсное отношение. Но так как начало пробоя часто не может быть очень точно измерено, лучше обозначить запаздывание длительностью волны от достижения статического напряжения U_0 до повторного достижения того же напряжения, т. е. временем, в течение которого напряжение волны больше U_0. Здесь к определенному выше запаздыванию добавляется еще очень короткое время между пробоем и достижением статического напряжения.

h) Импульсное отношение

На рис. 219 показаны измерения, проведенные Пиком на искровом разряднике с игольчатыми электродами при постоянном переднем фронте (экспоненциально возрастающем длительностью 1/2 *мксек*) и различных длине (5—20 *мксек*) и полярности волны. На ординате отложены максимальные значения волн (измеренные, например, безынерционно согласованным шаровым искровым разрядником). Статическое напряжение искрового разряда (переменное напряжение, 60 *гц*) также нанесено.

Вычисленное по этим кривым и приведенное на рис. 219 импульсное отношение β не зависит от пробивного промежутка; только при малых пробивных проме-

жутках оно несколько падает. С увеличением длины волны оно уменьшается. Можно также получить импульсное отношение отдельно для длительности возрастания и длительности существования.

На рис. 220 показано импульсное отношение при длительности возрастания 10^{-7} *сек* и длительности существования от $1{,}4 \cdot 10^{-6}$ *сек* до ∞ по Теплеру; левая ордината дает отношение импульсного напряжения, отнесенное к $T_и = \infty$, т. е. не к низкочастотному переменному напряжению, как в случае правой ординаты, а к длительности возрастания 10^{-7} *сек*. Импульсное отношение на правой ординате соответствует приведенному на рис. 219. При получении импульсного отношения следует обратить внимание на то, что при равных пробивных промежутках напряжение искрового разряда при импульсе и низкочастотном переменном напряжении может возникать из различных форм разряда (например, из предельных напряжений скользящего и тлеющего разрядов). Импульсное отношение поэтому не является полностью независимым от пробивного промежутка.

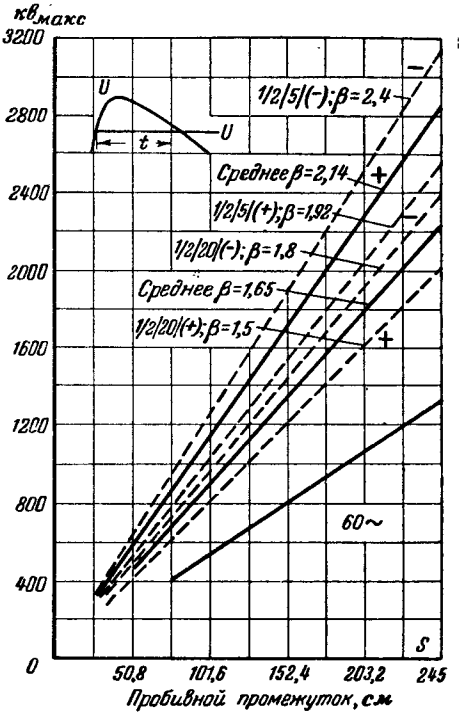


Рис. 219. Максимальное значение длины искрового промежутка между двумя одинаковыми иглами при различной длительности экспоненциально возврастающей бегущей волны различной полярности по отношению к земле по Пику.

Время, которое проходит между наложением определенного постоянного напряжения и пробоем, имеет известный разброс. Мак-Ичрон и Вейд [Л. 67] измерили

время катодным осциллографом и, например при постоянном максимальном напряжении 75 000 *в*, получили следующие значения (табл. 20).

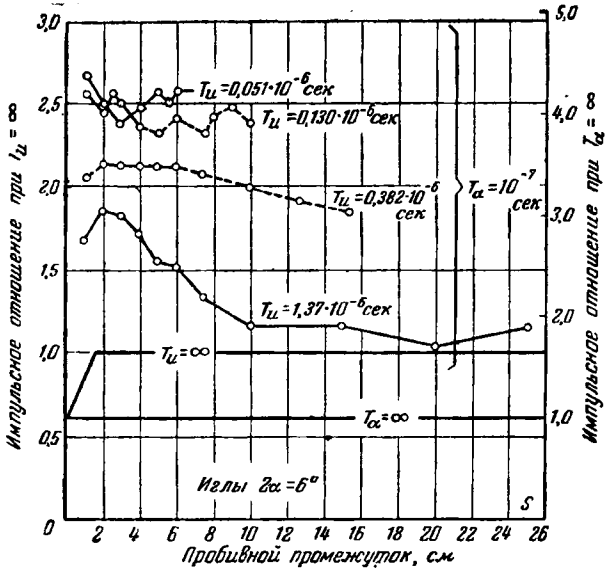


Рис. 220. Импульсное отношение при искровом разряднике с игольчатыми электродами при длительности возрастания 10^{-7} *сек* и различной длительности существования бегущей волны по Теплеру.

Среднее запаздывание пробоя возрастает при увеличении пробивного промежутка; процентное перенапряжение, которое вызывает запаздывание пробоя 2 *мксек*

Таблица 20

Запаздывание пробоя при игольчатых искровых разрядниках

Расстояние между иглами, *мм*	Относительная влажность, %	Температура, °С	Запаздывание пробоя, *мксек*		
			максимальное	минимальное	среднее
95	14	22	491	21	260
80	14	22	335	15	120
72	26	19	60	2	35

или меньше, в противоположность этому снижается при увеличениии пробивного промежутка.

Соотношение между β и временем выдержки t, по крайней мере для не очень коротких переднего фронта и длины волны, можно выразить по Пику следующим уравнением:

$$\beta = 1 + \frac{a}{\sqrt{t}},$$

где $\beta = \frac{U}{U_0}$ — импульсное отношение;

t — время, *мксек*;

a — постоянная, которая зависит от формы волны и полярности (а при известных обстоятельствах также от пробивного промежутка) (см. табл. 21 и 22 и рис. 221).

Если β и a известны, то можно запаздывание пробоя рассчитать из

$$t = \left(\frac{a}{\beta - 1}\right)^2.$$

Рис. 221 показывает соответствие измеренных величин и вычисленной кривой при линейно возрастающих волнах различной полярности (по Пику). Но для t

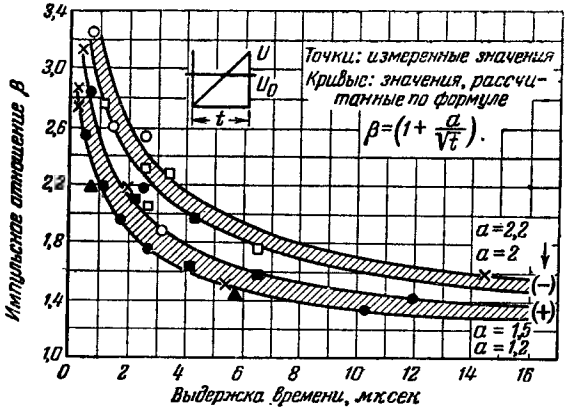


Рис. 221. Импульсное отношение при линейно возрастающих волнах напряжения и различной полярности по Пику.

Таблица 21

Влияние формы волны на искровую постоянную

Форма волны	Иглы		Изоляторы	
Экспоненциально возрастающая, большая длительность существования	(+)	(—)	(+)	(—)
Фронт... длина $^1/_2$... 40 *мксек*	1,4	1,9	1,1	1,5
$1^1/_2$... 40 *мксек*	0,8	—	0,6	0,9
Прямоугольные волны с длительностью фронта $^1/_2$ *мксек*	—	—	0,8	—
Линейно возрастающие волны	(1,2	2,0)	0,9	1,2
	(1,5	2,2)	—	—

в этом случае (линейная волна) дано время от начала волны.

Для трех форм волн и различных длительностей в табл. 21 и 22 приведены постоянная a и импульсное отношение β для импульсных игольчатых разрядников, а также для гирляид изоляторов.

Таблица 22

Импульсное отношение β и длина пробивного промежутка

Экспоненциально возрастающая волна (рис. 219)	Иглы		Изоляторы	
Фронт... длина волны	(+)	(—)	(+)	(—)
$^1/_2$... 5 *мксек*	1,92	2,4	1,75	1,95
1... 5 „	—	—	1,50	1,65
$1^1/_2$... 5 „	—	—	1,46	1,58
3... 5 „	—	—	1,28	1,34
$^1/_2$...20 „	1,5	1,8	1,58	1,7
1... 20 „	—	—	1,33	1,40
$1^1/_2$...20 „	—	—	1,25	1,33
3... 20 „	—	—	1,15	1,20
$^1/_2$...40 „	1,33	1,55	1,40	1,50
1... 40 „	—	—	1,22	1,30
$1^1/_2$...40 „	—	—	1,18	1,28
3... 40 „	—	—	1,10	1,15

i) Влияние полярности волны

Полярность играет роль тогда, когда игольчатые электроды имеют несимметричное напряжение относительно земли (наиболее часто один полюс заземлен) или электроды различны (игольчатый электрод против пластины). При одном заземленном полюсе и одинако-

вых игольчатых электродах импульсное отношение для положительного изолированного электрода ниже (до 10%), чем для отрицательного электрода. На рис. 221 показаны положительное и отрицательное импульсные отношения при линейно возрастающем фронте волны. В табл. 21 и 22 приведена полярность для α и β (положительная относительно земли или отрицательиая волна). При неравных электродах влияние полярности может быть очень большим. При крайнем случае острие — пластина напряжение искрового разряда при отрицательном острие почти на 100% выше, чем при положительном. В гирляндах изоляторов также имеются неодинаковые электроды, так что получаются различные импульсные отношения в зависимости от полярности провода относительно подвески, как при одном заземленном полюсе. В последнем случае, который положен в основу табл. 21 и 22, эффект полярности больше.

k) Практические измерения бегущих волн

Измерения игольчатыми искровыми разрядниками для определения длительности, формы и полярности бегущих волн производятся следующим образом.

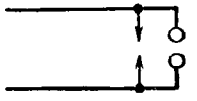


Рис. 222. Измерение неизвестных бегущих волн отношением длин пробивных промежутков в игольчатых и шаровых искровых разрядниках.

Прежде всего принимают, что форма и полярность бегущих волн приблизительно известны. Сначала искровым разрядником, импульсное отношение которого равно 1, например облучаемым шаровым искровым разрядником (рис. 222), определяют максимальное значение неизвестной волны. Потом определяют игольчатым искровым разрядником пробивной промежуток, при котором происходит искровой пробой. По рис. 219 из этих двух значений получают длительность бегущей волны ($U_{\text{макс}}$ зависит от пробивного промежутка при различных длинах волн). Можно также рассчитать импульсное отношение и по рис. 221 получить длительность волны (β зависит от t) или определить время запаздывания по формуле $t = \left(\frac{a}{\beta - 1}\right)^2$.

Если форма и поляриость волны неизвестны, то можно большим числом измерений искровым разрядиикам

с различными импульсными отношениями, например игольчатым искровым разрядником и гирляндой изоляторов, по табл. 21 и 22 сделать заключение о форме и полярности волны.

По одновременному измерению искровыми разрядниками с шаровыми и игольчатыми электродами можно также точно замерить фронт бегущей волны; в этих измерениях волна отсекается искровым разрядником с игольчатыми электродами в различных точках фронта (установка различных пробивных промежутков игольчатого искрового разрядника). Шаровой искровой разрядник измеряет высоту переднего фронта в точке отсечки.

l) Искровой закон Теплера

Для искры между двумя электродами при атмосферном давлении Теплер нашел закон, который простейшим образом связывает искровое сопротивление R, длину искры F^* и протекающее с начала возникновения искры количество электричества Q:

$$R = \frac{kF}{Q}.$$

Здесь R — в омах; Q — в кулонах; F — в сантиметрах; k — так называемая искровая постоянная, *ом · к/см*. При 760 *мм рт. ст.* и 20° С k имеет величину порядка 10^{-4} *ом · к/см*.

Теплер открыл закон сначала при скользящем разряде, но потом стало возможным распространить его также и на искру в пространстве. Закон действителен только для искр, а не для других форм разряда, как, например, тлеющий или кистевой разряд, а также электрический дуговой разряд; он действителен также пока эффекты температуры и диффузии или рекомбинации ионов не играют никакой роли; так как длительность искры вообще очень мала и составляет 10^{-8}—10^{-7} *сек*, закон действителен с достаточной точностью.

m) Искровая постоянная

Абсолютное значение k колеблется при различных измерениях, но вместе с тем k остается достаточно по-

* Значение F соответствует произведению lp в разд. «L, 2».

стоянным. По Майеру $k \approx 0{,}1 \cdot 10^{-3}$; кроме того, k возрастает с повышением напряжения, как показывает рис. 223. Кроме того, были проведены измерения Мюллером на шарах диаметром 25 *мм*, в то время как значения Майера были получены на шарах диаметром 50 *мм*. При игольчатых электродах k намного меньше из-за сильной предварительной ионизации последующего искрового канала ($k = 0{,}044 \cdot 10^{-3}$ при острие с радиу-

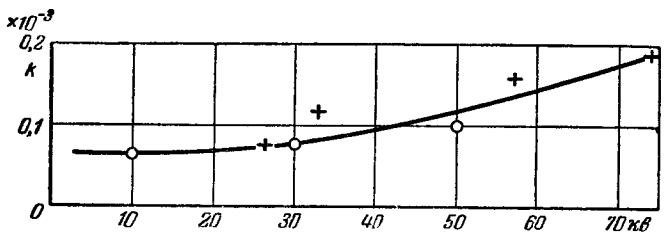


Рис. 223. Зависимость искровой постоянной k от напряжения; измерения Мюллера с шарами диаметром 25 *мм*; измерения Майера с шарами диаметром 50 *мм*.

сом закругления 0,75 *мм*, расположенным против шара; пробивной промежуток 30 *мм*; напряжение искрового разряда 45 *кв*). Позднее Теплер дает $k = (0{,}12 \div 0{,}20) \times 10^{-3}$, в среднем $0{,}15 \cdot 10^{-3}$, как истинное значение, которое не подвержено влиянию специальной экспериментальной установки[1]. В зависимости от конструкции установки вносят коррективы, учитывающие влияние затяжки искры, индуктивность, емкость, окружающую среду, отражение в начале и конце провода и т. п. От давления воздуха k не зависит; k приблизительно обратно пропорционально абсолютной температуре окружающего искру воздуха, так что искровой закон можно записать так:

$$R = \frac{k_0 F}{Q} \cdot \frac{273}{T}.$$

При этом k_0 — искровая постоянная при 0° С.

Применения. Формы бегущих волн. Особенно важное для целей измерения следствие искрового закона заклю-

[1] Кроме того, k зависит от рода газа, так как ионизационная способность и время деионизации являются величинами, определяющими k. Для аргона $k = (0{,}4 \div 0{,}9) \cdot 10^{-3}$.

чается в том, что фронт возбужденных искрами блуждающих волн должен следовать этому закону, как сама искра. Благодаря этому можно рассчитать фронт волны для различных случаев.

Если рассчитывают зависимость напряжения от времени на искровом разряднике в контуре, который образован только из емкости C и искрового разрядника с искровым сопротивлением R и не содержит омического сопротивления, то получают из равенства $R=kF/Q$ дифференциальное уравнение

$$\frac{du}{dt}=-u\,\frac{U_0-u}{kF},$$

при этом u — напряжение на искровом разряднике для времени t, а U_0 — напряжение в начале разряда.

Рис. 224 дает, таким образом, рассчитанную кривую u/U_0 в зависимости от $\frac{U_0}{kE}\,t$; t есть время в секундах от момента, когда достигает значения $U_0/2$. Здесь имеется наибольшее изменение напряжения в единицу времени или крутизна волны. Она рассчитывается по

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_{\text{макс}}=\frac{1}{4}\cdot\frac{U_0^2}{kF}.$$

Как видно, кривая не зависит от емкости C.

Другой предельный случай, когда контур задан с C, L и неограниченно большим омическим сопротивлением W. Это случай бесконечно длинных проводов с волновым сопротивлением Z, на которые через искровой разрядник поступает бегущая волна; здесь получается:

$$\frac{du}{dt}=-\frac{u^2}{kF}\cdot\frac{U_0-u}{U_0};$$

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_{\text{макс}}=-\frac{4}{27}\cdot\frac{U_0^2}{kF}.$$

Для случая конечного омического сопротивления W получают сложные уравнения.

п) Определение длительности искры

Для определения общей длительности искры лучше всего заменить приведенную на рис. 224 кривую синусоидой, средняя точка которой расположена при $t=0$,

как и у настоящей кривой, и длительность половины колебания составляет

$$t = \frac{2\pi}{\frac{U_0}{kF}}, \text{ сек.}$$

В течение времени t протекает 92% заряда. t зависит только от $\frac{U_0}{F}$ — отношения наивысшего напряжения (напряжения искрового разряда) к пробивному промежутку и, таким образом, зависит также от формы электродов, так как напряжение искрового разряда зависит как от пробивного промежутка, так и от формы электродов. Так, при изогнутых электродах получается бо́льшая длительность разряда, чем при плоских. t сравнительно мало изменяется с пробивным промежутком, так как вообще U_0, по крайней мере при слабо изогнутых электродах, изменяется примерно пропорционально пробивному промежутку; длительность разряда между плоскими электродами и большими шарами при пробивном промежутке от 1 до 20 *см* составляет от $0{,}1 \cdot 10^{-6}$ до $0{,}3 \cdot 10^{-6}$ *сек*. К этому времени разряда относится не время, которое необходимо для образования конечной величины тока (предварительный процесс, запаздывание искры), а только время падающей характеристики искры.

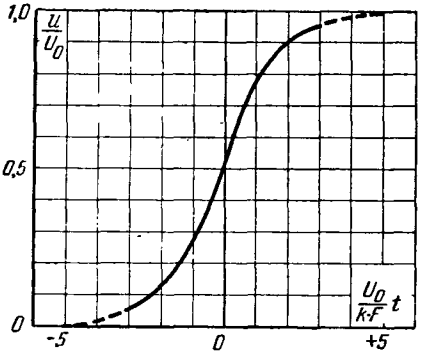


Рис. 224. Изменение с течением времени напряжения на искровом разряднике в контуре с емкостью C и искровым сопротивлением R.

Переход светящихся нитей в искры происходит по Теплеру, когда примерно одна статическая единица заряда протечет по светящейся нити.

о) Последовательные сопротивления и емкости у искровых разрядников

Запаздывание напряжения может стать значительным при больших сопротивлениях и емкостях. Для зарядки емкости измерительного разрядного промежутка через сопротивление, как известно, требуется определенное время, которое получается из следующего уравнения:

$$E_C = E\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \text{ (рис. 225).}$$

Здесь R — в омах, C — в фарадах, t — в секундах, E — в вольтах.

Отсюда

$$\frac{E - E_C}{E} = e^{-\frac{t}{RC}}; \quad t = -RC \ln \frac{E - E_C}{E}.$$

Если емкость разрядного промежутка равна 1,4 *мкф*, последовательно включенное сопротивление 10^6 *ом*, то длительность от включения E до 50% E на разрядном промежутке составляет 1 *сек* и достигает 4,3 *сек* при 95%[1] конечного значения. В табл. 25 для различных значений $RC=T$ рассчитано t для двух случаев, когда напряжение на конденсаторах составляет 10 и 1% своего конечного значения, т. е. $\frac{E - E_C}{H} = 0{,}1$ и 0,01. Значение 10^{-11} *ф* соответствует по порядку величины емкости искрового разрядника с шаровыми электродами; при $R=1$ *Мом* время $t_{1\%}$ составляет $46 \cdot 10^{-6}$ *сек*, при 10^9 *ом* 0,05 *сек*. Если в течение этого времени напряжение еще повышается, то разряд происходит при кажущемся слишком высоком напряжении.

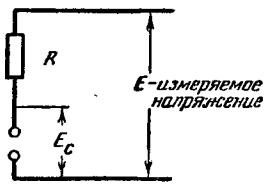


Рис. 225. Зарядка искрового разрядника через сопротивление R.

Если имеется не постоянное напряжение E, а периодическое переменное напряжение, то кратковременно существующее зарядное напряжение производит умеиьшение наивысшего напряжения, приложенного к искровому разряднику.

Количественно это можно исследовать следующим образом:

$$\frac{E_C}{E}=\frac{\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}=\frac{1}{k},$$

если ω — угловая частота переменного напряжения.

Отсюда

$$k=\frac{E}{E_C}=\sqrt{(\omega CR)^2+1};\ E_C k=E.$$

Таким образом, напряжение E_C, измеренное с помощью измерительного искрового разрядника, должно быть умножено на поправочный коэффициент k, чтобы получить измеряемое напряжение E. Коэффициент k зависит от ωCR и дан в табл. 23; практически k при $\omega CR<0{,}1$ равно 1, а при $\omega CR>10$ равно ωCR.

Таблица 23

Поправочный коэффициент для постоянной времени ωCR

ωCR, *ф·ом/сек*	k	ωCR, *ф·ом/сек*	k	ωCR, *ф·ом/сек*	k
10^4	10^4	2	2,236	0,1	1,005
10^2	10^2	1	1,414	0,01	1,0
10	10,050	0,8	1,281	—	—
8	8,062	0,6	1,166	—	—
6	6,083	0,5	1,118	—	—
5	5,099	0,4	1,077	—	—
4	4,123	0,3	1,044	—	—
3	3,162	0,2	1,019	—	—

Измерения Шмитца и Риенгоффа с шаровым искровым разрядником ($D=25$ *см* и $R=10{,}96$) при постоянном напряжении и переменном напряжении 500 *гц* показали, например, следующие значения E, необходимые для пробоя искрового разрядника, измеренные вольтметром высокого напряжения Штарке — Шредера (табл. 24).

Таблица 24

Данные для пробивных промежутков при постоянном напряжении и переменном напряжении 500 *гц*

S, мм	Постоянное напряжение, $кв_{макс}$	Переменное напряжение 500 *гц*, $кв_{макс}$	Переменное напряжение, умноженное на $\frac{1}{k}$, $кв_{макс}$
2	8,9	15,0	8,85
3	11,4	19,7	12,3
4	14,8	24,0	14,9
5	17,7	29,0	18,2

Видно, что с поправкой k получается достаточно точное значение.

р) Временные границы применения искровых разрядников

По данным Флетчера [Л. 68] (рис. 226 и 227) установлено, что шаровые искровые разрядники могут быть использованы для надежных измерений импульсов на-

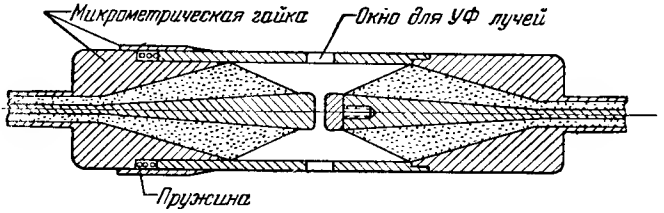


Рис. 226. Исследовательский искровой разрядник Флетчера с наружной настройкой для исключения паразитных индуктивных и емкостных связей.

пряжения длительностью менее 10^{-9} *сек*. Конструкцией Флетчера удается установить максимальную крутизну 100 *кв/мм*. В пересчете на единицу времени это соответствует $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек* $\cdot 10^5$ *в/см* $= 3 \cdot 10^{15}$ *в/сек*.

Рисунок 226 показывает применяемый Флетчером прецизионный искровой разрядник с микрометрической установкой и ультрафиолетовым облучением. Измерительный промежуток экранирован для устранения наружной емкостной связи и искажения поля.

На рис. 227 показаны результаты измерений, которые по сравнению с постоянным током искажены неизмеримо мало.

Для того чтобы получить такие короткие импульсы напряжения, Флетчер применял импульсный генератор, показанный на рис. 228. Кабель, формирующий импульсы, вследствие своей длины является емкостью. Пробой происходит в атмосфере азота давлением 40 *ат*. В течение $4 \cdot 10^{-10}$ *сек* получают падение напряжения 20 *кв*.

Для деления этого краткого импульса для осциллографических измерений создан делитель напряжения по рис. 229. Полиэтиленовый кабель окружен цилиндром с изоляцией из TiO_2, как «жесткий кабель», в форме емкостного делителя напряжения. Вследствие высокой емкости изоляции из TiO_2 на нее попадает только очень уменьшенное импульсное напряжение.

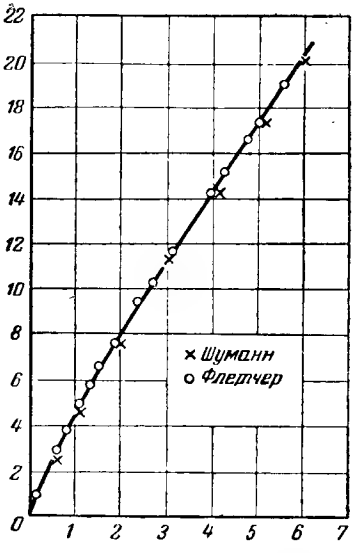


Рис. 227. Измеренное напряжение пробоя при постоянном напряжении и импульсном напряжении.
Результаты представляют средние значения большого числа измерений и сравнены с результатами Шуманна.

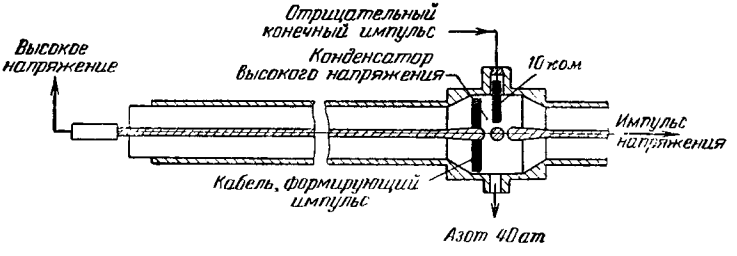


Рис. 228. Схема генератора импульсов с очень высокой крутизной напряжения 20 *кв* со временем возрастания $4 \cdot 10^{-10}$ *сек*. Коаксиальный конденсатор, который является носителем энергии, служит для того, чтобы поддерживать остроту амплитуды импульса.

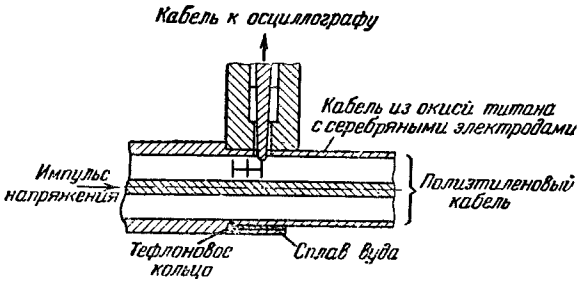


Рис. 229. Соединительный отрезок делителя напряжения для чрезвычайно крутых импульсов, состоящий из двух концентрично расположенных коаксиальных проводящих кабелей, характеристические полные сопротивления которых образуют отношение делителя напряжения 100 : 1.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ. СИЛЬНОТОЧНЫЙ ШУНТ

Для измерения высоких значений токов служит весьма малоиндукционное измерительное сопротивление, включенное в разрядный провод, на котором возникает падение напряжения, пропорциональное разрядному току, которое может быть подведено к осциллографу или — при очень больших напряжениях — к измерительному искровому разряднику.

На рис. 230 показано весьма малоиндукционное измерительное сопротивление для измерения больших сил тока катодным осциллографом. Импульсный ток может здесь проходить в направлении стрелки *1* сверху к земле. При этом он проходит через крышки *2* с подобным шпильке для волос крайне узким двойным полосовым шлейфом *1*. Он может быть также изготовлен из большого числа или — при необходимости более высокого сопротивления — малого числа отдельных шпилькоподобных проволок.

При больших токах шлейф, как правило, изготавливается жестким (из бронзы и т. п.) для восприятия неизбежных больших электромагнитных силовых импульсов. Вследствие почти бифилярного характера и малого охватываемого пространства индуктивность петлевого шлейфа *1* очень мала и может составлять только 10^{-9} *гн*. После прохождения шлейфа *1* импульс тока протекает

через вторую крышку *2*, а затем через цилиндрическую связывающую часть к земле. Для того чтобы проложить измерительный провод к осциллографу без индуктивного влияния, неизбежного при измерениях очень большой крутизны возрастания тока, все выполняют, как показано на рисунке, концентрично и измерительный кабель, показанный пунктиром, располагают концентрично внутри проводящего цилиндра так, чтобы не подвергнуть его никакому нарушающему влиянию поля. Можно, например, выполнением шлейфа *1* в виде двух бронзовых шайб толщиной 0,2 *мм* в масштабе рисунка 1 : 1 получить сопротивление около 10^{-4} *ом*. Его индуктивность составляет около 10^{-9} *гн*. При импульсе тока 10^5 *а* получают на нем напряжение 10 *в*, которое можно удобно осциллографировать. Граница выше описанных измеряемых величин вытекает из следующих соображений. Известно, что падение напряжения на индуктивности $U = L\frac{dI}{dt}$. Если ток возрастает от 0 до 10^5 *а* в течение 10 *мксек*, то крутизна возрастания составляет 10^{10} *а/сек*. На заданной индуктивности 10^{-9} *гн* = 1 *см* при этой крутизне возрастания в соответствии с приведенной выше формулой падает напряжение 10 *в*. Видно, что при такой крутизне возрастания лежит уже граница описанного выше измерительного сопротивления. Если сопротивление измерительного шлейфа *1* составляет только 10^{-5} *ом* при такой же индуктивности, то уже при падении напряжения 1 *в* достигается измеряемый предел для такой индуктивности и омического падения напряжения, т. е. 10^9 *а/сек*. Так как желательно получить как можно более высокую омическую составляющую падения на-

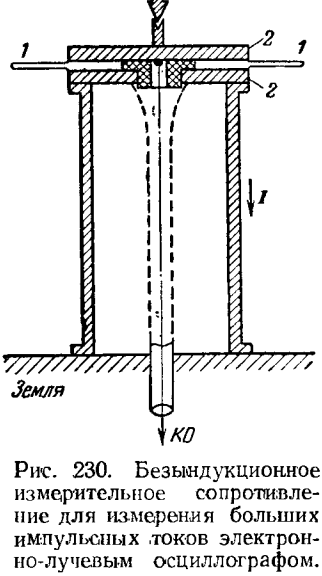


Рис. 230. Безындукционное измерительное сопротивление для измерения больших импульсных токов электронно-лучевым осциллографом. *1* — провода сопротивления; *2* — концевые шайбы.

пряжения, нужно делать измерительное сопротивление *1* как можно более высокоомным. Но, с другой стороны, запрещаются, например при импульсной сварке, потери напряжения больше, чем 1 *в*. Также при сопротивлениях больше, чем 10^{-4} *ом*, провода шлейфа *1* становятся настолько тонкими, что они подвергаются электродинамической деформации или разрушению. Видно, что верхняя граница крутизны возрастания тока больше чем 10^9 *а/сек* создает известные трудности для измерительной техники и что верхний предел измерений составляет 10^{10} *а/сек* даже при совершенной конструкции и низкоиндуктивном выполнении вследствие обычной собственной индуктивности всех сопротивлений. Измерение еще круче возрастающих полей тока производится только косвенно измерением возбуждаемых ими магнитных полей или индуцируемых импульсов напряжения в рядом расположенных проводах. Тогда получают напряжение $U=n\frac{d\Phi}{dt}$, т. е. первую производную тока, а не действие самого тока. Поэтому полученное и заосциллографированное таким образом напряжение нужно проинтегрировать, и получают обычно вследствие не всегда известных краевых условий соответствующую неточность. Поэтому для измерения очень высоких импульсов тока целесообразно применять датчики Холла и измерять возбуждаемое магнитное поле, которое строго пропорционально току.

4. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

a) Делитель напряжения

Для измерения высоких напряжений обычно используется делитель напряжения, который расположен между высоким напряжением и землей и с которого снимается измеряемое напряжение.

b) Емкостный делитель напряжения

При чисто емкостном делителе измеряемое напряжение делится с помощью последовательного включения конденсаторов. Теория деления напряжения при этом делителе проста.

При емкостном делении напряжения, которое особенно заслуживает внимания, если импульс высокого напряжения наблюдается без омической нагрузки, производят емкостное подключение измерительного осциллографа или измерительного искрового разрядника к источнику.

Простой пример.

На входную втулку осциллографа включают кабель длиной 1 *м*, свободно подвешенный в воздухе, и заботятся о подавлении низкой частоты небольшой емкостью связи в усилителе так, что учитываются, например, только частоты выше 10^5 *гц*. Дополнительное встраивание омического нагрузочного сопротивления для ограничения частоты вносит искажение из-за емкостной связи между этим разрядным сопротивлением и измерительными проводами, например измерительной антенной, т. е. среднее значение напряжения и напряжение, показанное на осциллографе, больше не будут соответствовать возникающей на полюсе высоковольтного импульса кривой. Емкостный делитель напряжения вообще чрезвычайно просто изготавливается; в высоковольтных испытательных установках для техники импульсного разряда применяются как емкостные, так и омические делители напряжения в зависимости от того, напряжение холостого хода или диаграмму напряжения при омической нагрузке намерены снять. В каждом случае нужно позаботиться о том, чтобы измерительный осциллограф был удален от места разряда насколько возможно, так как спонтанно возникающее магнитное поле во всех разрядных целях может искажающе отклонить электронный луч.

Конденсаторные трансформаторы напряжения сегодня конкурируют с измерительными трансформаторами, причем по сравнению с последними они имеют преимущество в том, что во всей области низких частот они не зависят от частоты и позволяют также производить осциллографические измерения, в то время как измерительные трансформаторы позволяют производить точные измерения напряжения только в узких пределах частот.

Емкостный делитель может передавать неискаженными даже очень быстро протекающие процессы. Передача на измерительную отпайку также еще верна по форме, если приложенное к делителю напряжение не распределено равномерно между отдельными конденсаторами делителя, так как деление напряжения не зависит от формы кривой приложенного напряжения. Высоковольтные конденсаторы, используемые для изготовления такого емкостного делителя, должны быть по возможности безындуктивными; кроме того, величина емкости не должна меняться с изменением приложенного напряжения. В особенности нужно обращать внимание на то, чтобы коэффициент трансформации при высоких напряжениях разряда (коронирование арматуры) не зависел от напряжения и полярности.

В импульсной схеме последовательно включенные конденсаторы делителя расположены параллельно испытываемому объекту и действуют как добавочная нагрузочная емкость; это часто желательно в установках с высоким импульсным напряжением. Недо-

статок емкостного делителя заключается в том, что пластины осциллографа должны быть непосредственно подключены к отпайке емкостного делителя. Это требование у делителей высокого импульсного напряжения может быть невыполнимым, так как осциллограф может стоять не непосредственно около делителя. Но длинные провода между делителем и осциллографом искажают кривую быстрого процесса, а именно в том случае, если собственные колебания этой измерительной линии сильно демпфированы. Это ограничение отпадает при чисто омическом или смешанном делителе, при которых частичное напряжение определяется на омическом сопротивлении.

c) Омический делитель напряжения

На рис. 231 показан принцип простого омического делителя напряжения, при рассмотрении которого прежде всего пренебрегают всегда имеющимися индуктивно-

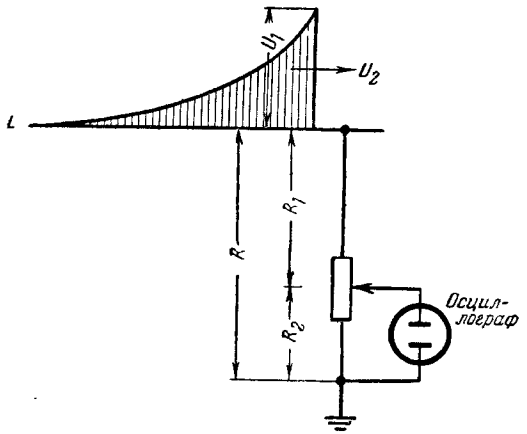


Рис. 231. Принципиальная схема и кривая напряжения на чисто омическом делителе напряжения.

стями и емкостями. К проводу L подключено сопротивление R; точка присоединения отклоняющих пластин электронного осциллографа делит его на два частных сопротивления: R_1 и R_2. Приходящая волна высотой U_1 вследствие этого снижается до значения

$$U_2 = \frac{R}{R + \frac{z}{2}} U_1,$$

если z — волновое сопротивление провода.

Обратное воздействие измерительного сопротивления на исследуемый процесс требует, чтобы было выбрано $2R \gg z$; но, с другой стороны, емкость отклоняющих пластин должна следовать возможно быстрее за изменениями напряжения на проводе высокого напряжения, для того чтобы не очень затянуть измеряемый процесс. Это условие требует возможно более низкого значения R, так как постоянная времени изменения напряжения на измерительных пластинах выражается как

$$T_a = C_a \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

где C_a — емкость измерительных пластин и подводящих к ним проводов.

Одновременно из этой формулы также видно, что C_a должно быть возможно меньшим.

При работах с импульсными схемами, в которых разрядное сопротивление R_e включено параллельно испытываемому объекту, R_e можно одновременно использовать как делитель напряжения. Так как это сопротивление вообще составляет несколько тысяч ом, T_a при импульсных измерениях снижается до допустимого значения.

При рассмотрении мы пренебрегли индуктивностью и различными емкостями делителя. Это вообще допустимо относительно индуктивности, так как при этом используют наиболее часто применяемые проволочные сопротивления ленточной формы с очень низкой индуктивностью, т. е. отношение $\frac{L}{R}$, определяющее затяжку фронта волны, пренебрежимо мало. Поэтому рассмо-

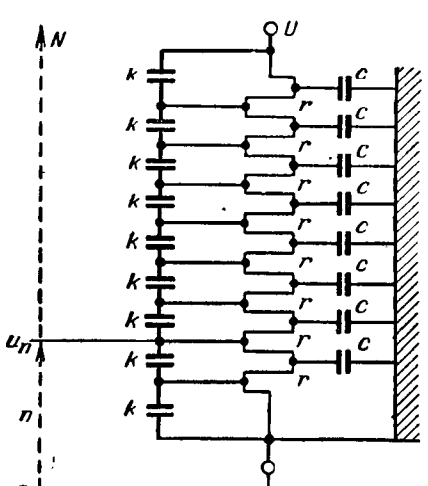


Рис. 232. Принципиальная схема смешанного делителя напряжения на сопротивлениях и емкостях.

трим только влияние емкостей делителя. Эквивалентная схема омического делителя с емкостями относительно земли и распределенными емкостями показана на рис. 232. При этом делитель разложен на N равных элементов, каждый из которых имеет сопротивление r и емкость относительно земли c.

Между элементами образуется «распределенная емкость» k. Таким образом, общая емкость делителя относительно земли составляет Nc и общая распределенная емкость $\frac{k}{N}$. Если на такую цепную линию подается волна с прямоугольным фронтом высотой U, то вдоль сопротивления в первый момент получается гиперболическое деление напряжения по известному соотношению:

$$u_n = U \frac{\sin\left(\frac{n}{N}\alpha\right)}{\sin\alpha},$$

так как деление напряжения для $t=0$ определяется только различными емкостями. Это означает, что в первый момент входа прямоугольной волны или при высокой частоте омический делитель ведет себя подобно чисто емкостному делителю с распределенной емкостью и емкостью относительно земли. В формуле n — порядковый номер рассматриваемого элемента, на котором теряется напряжение u_n, отсчитываемое от заземленного конца делителя; коэффициент $\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$ определяющий главным образом деление напряжения, представляет собой отношение общей емкости делителя относительно земли $C=Nc$ к общей распределенной емкости $K=\frac{k}{N}$.

При чисто омическом делителе α растет до ∞, так как число элементов N очень велико и поэтому общая распределенная емкость K очень мала.

На рис. 233 показана расчетная кривая напряжения на конце смешанного омически-емкостного делителя для различных значений α, причем предполагается протекающая прямоугольная волна.

Видно, что омический делитель при $\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}} = \infty$

удлиняет прямоугольный фронт на 1 *мксек*, причем собственная постоянная времени делителя

$$T_1 = \frac{RC}{\pi^2}$$

принята 0,5 *мксек*. Это означает, что напряжение несколько возрастает вместе с собственной постоянной времени.

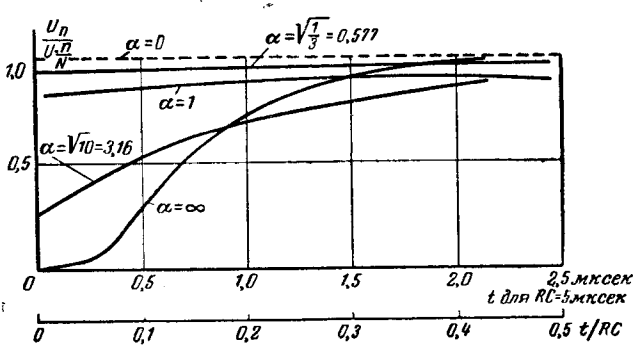


Рис. 233. Расчетная кривая напряжения U_n на конце смешанного омически-емкостного делителя напряжения при различных отношениях $\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$.

Для встречающегося на практике случая возрастания напряжения в течение 1 *мксек* требуется, чтобы собственная постоянная времени омического делителя

$$T_1 = \frac{RC}{\pi^2}$$

была на порядок величины меньше, чем установленное время фронта. При принятой общей емкости делителя относительно земли $C = 100$ *пф* R по порядку величины совпадает с разрядным сопротивлением R_e, поэтому R_e одновременно может быть использовано как делитель напряжения.

d) Смешанный емкостно-омический делитель напряжения

Для точной съемки процесса, развертывающегося за время, порядок величины которого составляет 10^{-7} *сек*, как, например, отсечки импульсной волны, омический

делитель напряжения вообще уже недостаточен. Для этих измерений целесообразно применить смешанный делитель напряжения, собранный из сосредоточенных сопротивлений и емкостей, у которого скомпенсировано искажающее влияние обычной емкости делителя относительно земли. При этом практически такой делитель напряжения выполняется как проходной изолятор высокого напряжения, т. е. как длинный фарфоровый корпус, который заключен в безындукционно намотанное сопротивление делителя напряжения.

Подробные исследования установили, что такая конструкция не соответствует практическим условиям измерения очень кратковременных импульсов высокого напряжения, которые имеются, например, при так называемом импульсном напряжении для эксплуатации искровых измерительных приборов, так как она может привести к ошибочному измерению величины напряжения и искажению протекания импульсного напряжения в измерительном контуре. В качестве причины этих ошибок указывают, что части, находящиеся под высоким напряжением, могут емкостно воздействовать на измерительный шунт, а, с другой стороны, на неравномерное распределение емкостного шунта в окружающем диэлектрике на отдельные зоны сопротивления делителя напряжения. В представленной на рис. 234 простой конструкции отдельные сопротивления делителя напряжения расположены внутри экранирующих корпусов, которые отделены один от другого промежуточными стенками и вследствие этого замкнуты до требуемых для прохождения токопроводов отверстий, и расстояние от стенок до держателей сопротивлений возрастает пропорционально среднему потенциалу, который имеет замкнутое сопротивление по отношению к заземленному полюсу измеряемого напряжения. При таком способе емкость делителя напряжения распределяется так, чтобы диэлектрические потери распределялись равномернее по делителю напряжения. На практике часто оказывается достаточным деление на 4—8 ступеней.

Фарфоровый изолятор *1* несет контакт высокого напряжения *2*, от которого кабель *3* ведет к последовательно включенным частным сопротивлениям W_1, W_2, W_3, W_4 и W_5 делителя напряжения. Эти сопротивления расположены в заземленных металлических корпусах

A_1, A_2, A_3 и A_4, диаметры которых r_1, r_2, r_3 и r_4 относятся, как средние потенциалы на сопротивлениях от W_1 до W_4, так, чтобы соотношение между расстоянием a отдельной точки делителя напряжения от точки заземления E и радиусом корпуса r, т. е. деление напряже-

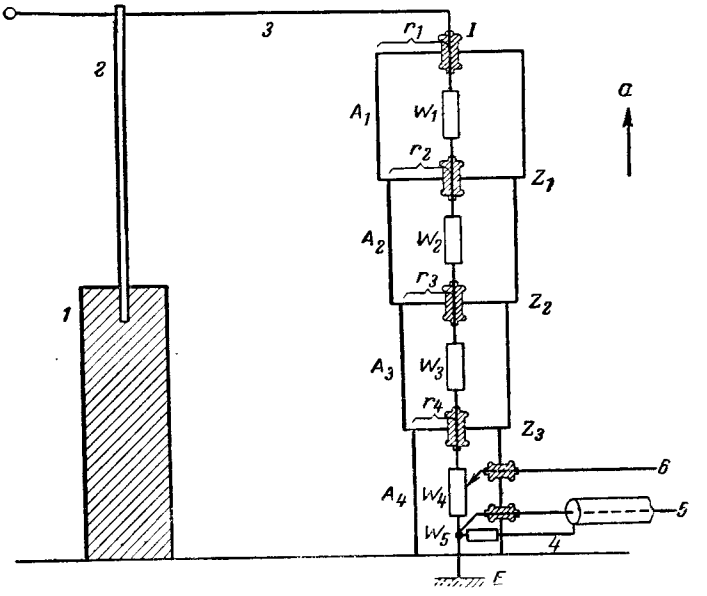


Рис. 234. Эскиз конструкции простого омически-емкостного делителя напряжения.

ния U на сопротивлении W, было дано диаграммой, представленной на рис. 235.

Экранирующие корпуса A полностью разделены стенками Z. В этих стенках предусмотрены отверстия для токопроводов; они снабжены проходными изоляторами I, которые изготовлены из электрически прочной керамической массы с минимальной диэлектрической постоянной.

К самой нижней экранирующей гильзе подключена заземленная оболочка бронированного кабеля, ведущего к осциллографу. Жила 5 бронированного кабеля 4 подключена между последними частичными сопротивления-

ми W_4 и W_5 так, чтобы на осциллограф поступало падение напряжения на сопротивлении W_5. Это падение напряжения целесообразно выбирать очень малым, и поэтому сопротивление W_5 не должно иметь собственного экрана, а может быть для упрощения конструкции просто радиально зажато внутри узкой экранирующей гильзы A_4. Для того чтобы сделать возможным измерение напряжения путем определения пробивного искрового промежутка одновременно или независимо от осциллографических измерений, целесообразно использованием изолированного проводника *6* вывести наружу из корпуса A_4 средний потенциал сопротивления W_4. Соответственно нужно принимать во внимание при расчете диаметра экранирующего корпуса A_4 емкость этого вывода.

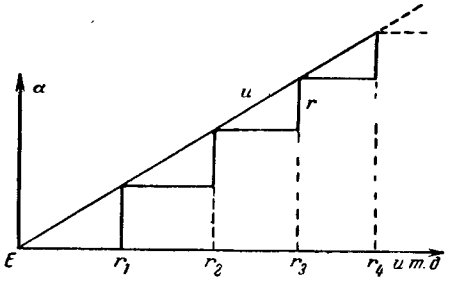


Рис. 235. Сравнение напряжений и радиусов по ступеням делителя напряжения, показанного на рис. 234.

Делитель напряжения этого вида весьма пригоден для крутизны возрастания напряжения до максимума за время до 10^{-7} *сек*; например, его можно еще использовать при общем сопротивлении 1000 *ом*, разделенном на 10 экранированных одна от другой ступеней, каждая по 100 *ом*, для измерения крутизны возрастания на 100 *кв* в течение 10^{-7} *сек*, что означает скорость возрастания до 10^{12} *в/сек*. Здесь можно снова воспользоваться измерительной техникой по Флетчеру, рассмотренной в разд. «М, З». Флетчер со своим емкостным делителем достигал измеряемой крутизны $5 \cdot 10^{13}$ *в/сек* (20 *кв* за $7 \cdot 10^{-10}$ *сек*).

Особое достоинство представленного здесь омического делителя напряжения состоит в том, что он одновременно выполняется как нагрузка схемы импульсного напряжения. Вообще схемы с импульсным напряжением требуют определенного разрядного сопротивления, чтобы работать в соответствии с поставленной задачей. Если это разрядное сопротивление конструируется отдельно,

то оно сразу нагружено емкостно только из-за своих геометрических размеров и длины проводов и имеет неприятное свойство вследствие своей спонтанной зарядки, особенно на подводящие провода, антенноподобно вызывать излучение магнитных силовых линий, которые уже при малых энергиях приводят к энергетически нарушающим потерям, а при больших энергиях чувствительно нарушают работу измерительных средств, в особенности электронно-лучевых осциллографов. Если согласующее сопротивление выполнено как делитель напряжения, причем обычно также большое число подобных сопротивлений может быть включено последовательно или параллельно, получается значительное упрощение для техники измерений. Самое нижнее сопротивление, которое, например, подведено к ординатной паре пластин осциллографа, может быть выполнено регулируемым, так как оно очень низкоомно, и вследствие этого становится неэффективным малый емкостный шунт на корпус; подобные измерительные сопротивления допускают, с одной стороны, чрезвычайно тонкие измерения при помощи чисто омического делителя напряжения, с другой — осциллографическую съемку с верной передачей кривой напряжения. Лишь при возрастании напряжения, которое затем сопровождается продолжительной постоянной составляющей, нужно позаботиться заранее о включении перед делителем напряжения изолированного конденсатора достаточной емкости, чтобы возрастание напряжения передавалось без искажения; между тем емкостная проводимость предварительного конденсатора очень высока по сравнению с проводимостью сопротивления; при последующем постоянном напряжении изолированный конденсатор производит действительное отделение напряжения. Этот вид схемы избирается в том случае, когда нужно заосциллографировать ход спонтанной зарядки и разряда конденсатора, заряжаемого до высокого напряжения. Так как на нижнем сопротивлении, предназначенном для точного измерения и имеющем малую величину, например только 10 *ом*, допустим без искажающего изменения формы кривой большой конденсатор в качестве параллельной емкости, можно провода, подводящие к осциллографу от нижнего измерительного сопротивления, выполнять как многометровые концентрические кабели и расположить

осциллографы так далеко от места разряда, чтобы можно было не бояться непосредственного статического или индуктивного влияния разрядного процесса на измерительный прибор.

5. ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ С ПОСЛЕДУЮЩИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Анализатор частоты для разрядов большой крутизны. Поскольку процесс разряда протекает через газовый разрядный промежуток, его можно наблюдать либо оптически, либо осциллографом. Если хотят световое излучение при протекании разряда определить количественно или качественно, то свет искры может падать на фотоэлемент, расположенный на расстоянии нескольких метров, и измеряют напряжение на его рабочем сопротивлении посредством лампового усилителя, который позволяет передать всю интересующую нас область частот и на выходе в качестве индикатора, реагирующего на пик напряжения, имеет хороший тиратрон или высоковакуумный генератор развертки. Накладыванием импульса напряжения на вход усилителя (разряд маленького конденсатора через омический делитель напряжения) можно заменить импульс напряжения на фотоэлементе и на делителе напряжения считывать величину импульса калибровочного напряжения. Изменения напряжения на фотоэлементе для уменьшения перевозбуждения усилителя производят ирисовой диафрагмой или серым фильтром. Для измерения изменений светового излучения во времени можно подавать за неимением импульсных осциллографов напряжение вакуумного фотоэлемента через одноступенчатый усилитель, который без затруднений работает до 10 *Мгц* (контроль *RC*-разрядом на сетку), на ординату осциллографа. При такой крайне упрощенной схеме отпадают ошибки вследствие выравнивания напряжения между ступенями усилителя. Абсцисса образуется чисто синусоидальным напряжением на колебательной катушке маленького кварцевого генератора, так чтобы не могли возникнуть никакие ошибки во времени.

На рис. 236 показана использованная опытная схема. Электронный луч специальной лампой, которая управляется вторым маленьким рабочим сопротивлением элемента по рис. 186, освещает экран в течение времени,

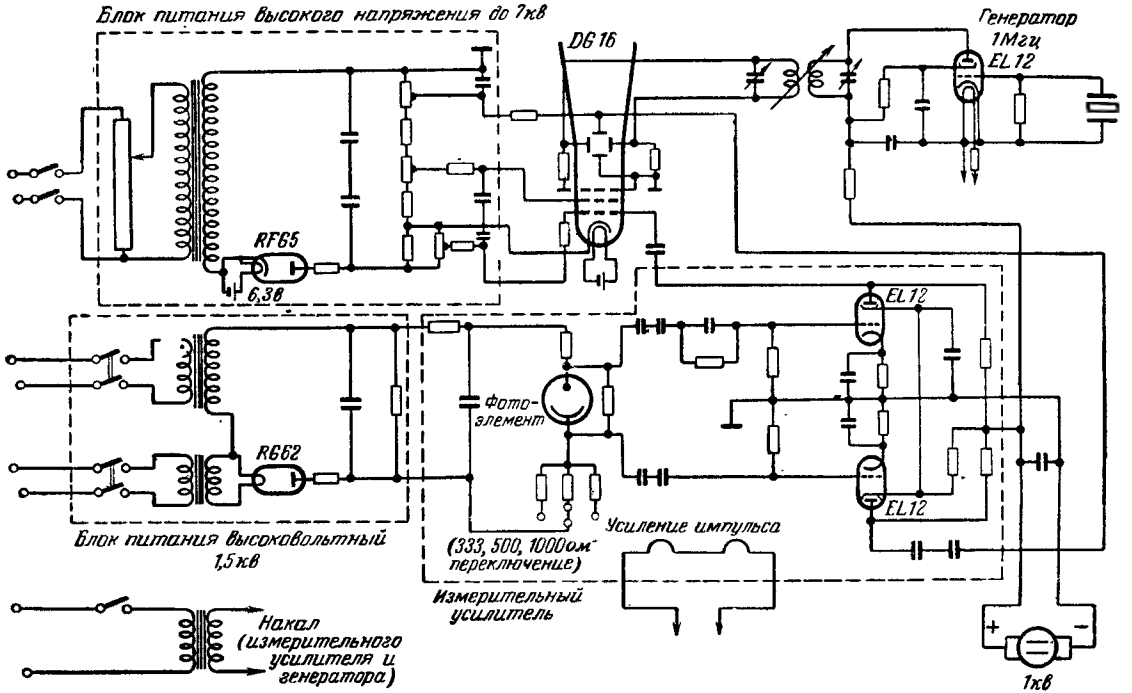


Рис. 236. Осциллограф с измерительным усилителем для съемки изменения во времени плотности света.

равного длительности процесса, так, что затвор съемочной камеры остается открытым. Снимок графически корректируется, чтобы получить протекание во времени светового излучения. Вставкой фильтра для инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой частей спектра перед фотоэлементом можно получить протекание во времени в отдельных областях спектра. Для изучения быстро протекающей части частот пригоден также способ по рис. 185. Фотоэлемент с обычным малым рабочим сопротивлением подключен через конденсатор вместо антенны на вход детекторного приемника. При каждой вспышке света в наушниках слышен щелчок, и теперь возможна калибровка сравнением разряда маленького конденсатора, включенного на такую же антенную втулку, который через омический делитель напряжения разряжается с постоянной времени $t=RC$, равной длительности световой вспышки. Таким образом, можно сравнивать громкость щелчка в различных частотных областях с характеристикой разряда RC-устройства, заданной как чистая e-функция. Метод является надежным и может экспериментально совершенствоваться. Включенным на выходе усилителя пиковым вольтметром можно производить количественные измерения.

6. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

а) Простая функциональная проверка приемника световых импульсов

Проверка приемника световых импульсов на функциональную способность, вследствие того что усилитель срабатывает только на удельный световой сигнал передатчика, выполнима с помощью соответствующего передатчика, что, естественно, означает значительные затраты. Очень прост действенный метод проверки приемника получается при помощи простых химических процессов воспламенения железо-цериевых частиц или других быстро сгорающих веществ.

Они генерируют высокочастотные, т. е. импульсные, световые вспышки малой яркости, которые приводят в действие приемное устройство на малом расстоянии от фотоэлемента приемника. Такое испытательное устройство не генерирует электрических искр. Дело идет о химических процессах при воспламенении железо-цериевых

частиц или других быстрых эффектах сгорания, создающих высокочастотные световые вспышки без колебаний в смысле колебательного контура. Понятие высокая частота в соответствии с общепринятыми техническими терминами здесь обозначает, что дело идет о высокой частоте следования с высокой скоростью изменения, о внезапном эффекте сгорания. При таком сгорании дело идет о быстро следующих один за другим чисто световых импульсах без колебаний. Эти световые импульсы, возникающие при указанном эффекте сгорания, не имеют таких же длительности и скорости возрастания, как у искрового передатчика, но имеют такую же характеристику функционирования. Лишь по своей интенсивности световые вспышки существенно отличаются от электрических сигналов передатчика. Это различие выравнивается расположением испытательного устройства на малом расстоянии от фотоэлемента.

Получение подобных воспламеняющихся частиц происходит в простом ручном аппарате, подобном карманной зажигалке, который для возбуждения приемного устройства действует непосредственно перед приемником и, таким образом, дает возможность производить чрезвычайно простую проверку приемника на его функциональную готовность. Так как число возникающих маленьких искр очень велико, их статистика очень хороша и можно испытывать чувствительность приемника по амплитуде с точностью до $\pm 3\%$ (например, расстояние от генератора искр 50 *см* для проверки чувствительности приема сигнала за 5 *км*).

b) Измерение амплитуды световых импульсов

Для измерения абсолютной высоты световых импульсов используют схему измерительного приемника, показанную на рис. 237. За фотоэлементом *90AV* расположены, например, 3 ступени широкополосного усилителя на лампах *EF93*, усиление которого регулируется потенциометром (посреди схемы — 0,1 *Мом*), который обрабатывает ширину полосы импульса и передает усиленный сигнал на релейную лампу, т. е. мультивибратор *ECC40* или другой двойной триод. Эти лампы эксплуатируются с катодной связью, вследствие чего автоматически получаются обратная связь и компенсация колебаний рабочего напряжения. Каждый раз при до-

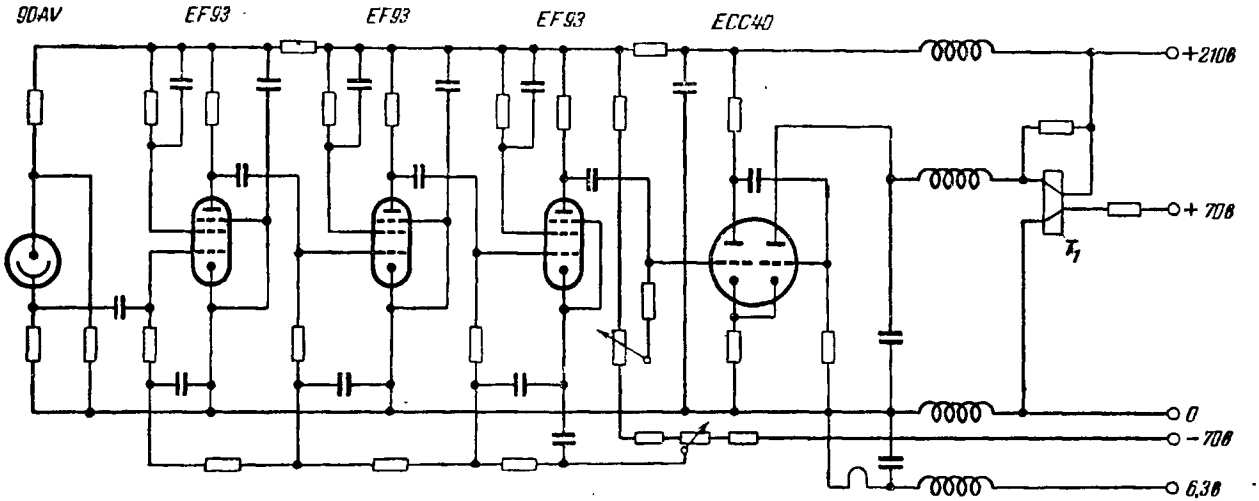


Рис. 237. Схема измерителя световых импульсов с регулируемым широкополосным усилителем и подключаемым релейным интегрирующим устройством для количественного определения амплитуды световых вспышек.

стижении чувствительности этой релейной лампы, отрегулированной показанным на схеме потенциометром 0,1 *Мом*, лампа опрокидывается и срабатывает реле *Т1*. Теперь можно точно откалибровать измеритель (рис. 238)

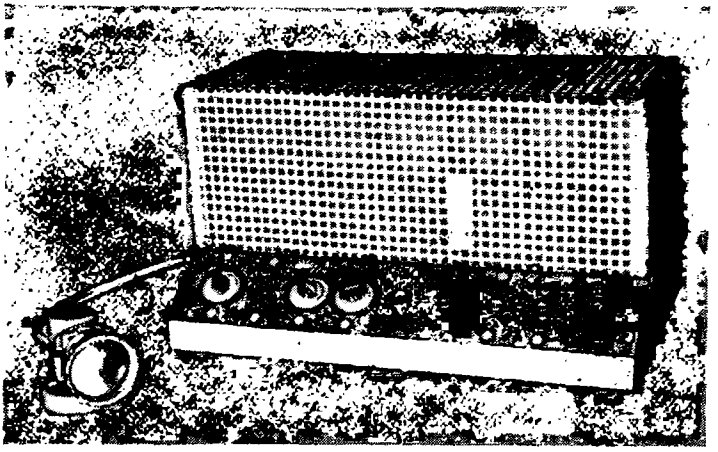


Рис. 238. Выполнение измерительного усилителя по рис. 237: слева — измерительный фотоэлемент с вдвигаемыми абсорбционными фильтрами, соединенный безъемкостным кабелем.

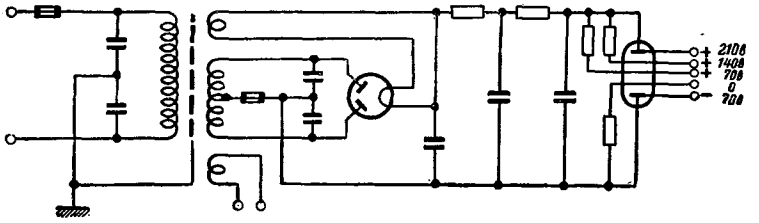


Рис. 239. Источник питания для схемы по рис. 237.

потенциометром 0,2 *Мом* и питать всю схему стабилизированным напряжением и изменением этого потенциометра довести до срабатывания реле *Т1*, когда воспринимаемый импульс, который обычно поступает периодически, имеет определенную интенсивность. Но можно также сравнивать импульсы различных видов чисто геометрически—изменением диафрагмы перед фотоэлемен-

том или уравнять тот же самый импульс, например прошедший через две диафрагмы, площадь которых относится как 1 : 10, установкой потенциометра и благодаря этому свести калибровку прибора к чисто геометрически-оптической. Взяв за основу эту простую технику измере-

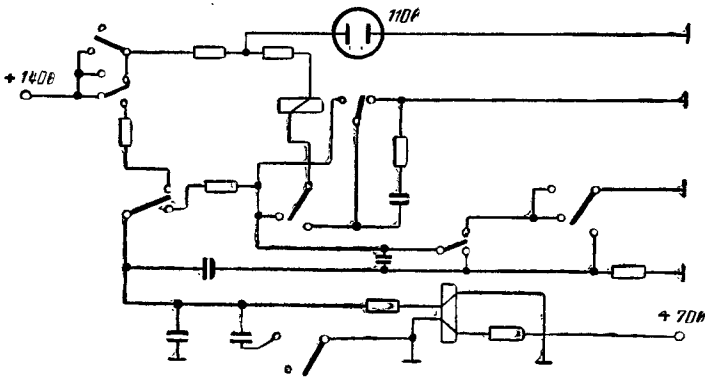


Рис. 240. Схема релейной части для интегрирования 5 и 50 вспышек, как и отметки отдельной вспышки.

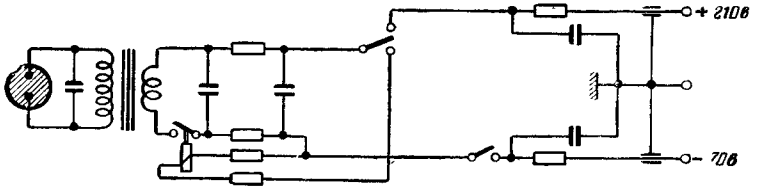


Рис. 241. Эталонный генератор для генерирования очень слабых высокостабильных вспышек. Лампа-вспышка с низким давлением газа, расположенная слева на чертеже, получает от источника стабилизированного зарядного напряжения трансформированные импульсы для зарядки маленького разрядного конденсатора 800 *пф*.

ний, можно в широких пределах фотометрически измерять все световые вспышки, возникающие в природе и разрядных контурах. Нужно производить обычную спектральную корректировку чувствительности фотоэлемента по цветной характеристике искры. На рис. 238 показано выполнение такого прибора. Фотоэлемент со вставными сменными фильтрами и плексигласовой собирающей линзой соединен посредством безъемкостного кабеля

с усилительной частью. На рис. 239, 240, 241 показаны питающие и вспомогательные приборы. В то время как представленный выше питающий прибор соответствует обычной схеме, сигнальное устройство можно включить либо на отдельный импульс, либо на накопительный прием одновременно 5 или 50 импульсов, быстро следующих один за другим. В зависимости от установки выключателя контакты реле так переключаются, что заряжаются вспомогательные конденсаторы и после заряда соответствующего измерительного конденсатора возбуждается следующее реле и срабатывает лампа накаливания. Подобное накопительное следование включений имеет смысл, если дело идет об определении средней интенсивности большой серии регулярных вспышек света (например, при измерениях высоты облаков, стробоскопах или трансмиссометрах).

c) Абсолютное измерение калибровочным генератором

Для того чтобы иметь в распоряжении стандартную вспышку света для калибровки и постоянной последующей калибровки калибровочного приемника, нужна изображенная на рис. 241 схема калибровочного генератора. При этом маленькая разрядная лампа с конденсатором 800 *пф* возбуждает слабую вспышку посредством слабого импульса, получаемого разрядом конденсатора 0,1 *мкф* на первичную обмотку маленького импульсного трансформатора. Конденсатор 0,1 *мкф* разряжается через вакуумное реле или его контакты на первичную обмотку маленького импульсного трансформатора и возбуждает световую вспышку постоянной яркости, так как разряд конденсатора происходит со стабилизированным напряжением. Для этого используют маленькие ксеноновые лампочки с пониженным давлением так, чтобы световая вспышка имела незначительную интенсивность. Если необходимо, дальнейшее ослабление легко получают соответствующим серым нейтральным фильтром. Для частых измерений интенсивность калибровочной лампочки устанавливается такой, что по сравнению с измеряемым объектом, например лампой прибора обгонной сигнализации автомобиля, достигается удобный масштаб, например по расстоянию 1 : 1 000, т. е. по интенсивности $1 : 10^6$. Тогда, например, для расстояния 300 *м* импульсная лампа должна отстоять от калибровоч-

ного генератора на 30 *см*. Если потенциометр калибровочного приемника установлен на расстояние 30 *см* от маленькой лампы микровспышек калибровочного генератора, то чувствительность соответствует стандартной чувствительности, которая необходима для приема сигнала импульсной лампы на расстоянии 300 *м*. По этой методике промышленностью калибруются как импульсные лампы, так и импульсные приемники в пределах сигнализации световыми вспышками.

d) Приемник световых импульсов при измерении сцинтилляций

Особое значение имеет распространение точных измерений импульсов света в технике так называемых счетчиков сцинтилляций. Здесь речь идет о точном измерении амплитуды отдельных световых вспышек, образующихся при распаде радиоактивного препарата, посредством умножителя и встроенного светящегося кристалла, показывающих количество поступающих излучений радиоактивного распада. Удалось создать счетчик сцинтилляций с автоматическим рассортированием амплитуд до 100 различных уровней, и каждый из этих 100 уровней подводится к отдельному счетному механизму так, что после измерения на 100 счетчиках можно прочесть, насколько была высока интенсивность излучения в любом дискретном интервале. Подобное устройство с постоянством амплитуды на длительное время работы схемы требует фотоумножителя с чрезвычайно постоянными свойствами, которые, помимо обычной стабилизации рабочего напряжения, можно обеспечить выбором всегда постоянной длительности освещения во время перерывов в работе. Для изучения превращения ядер в пределах применения изотопов исследовательские работы без подобного счетчика сцинтилляций сегодня совершенно невозможны.

Такая же техника применяется в спектрометрах при автоматическом количественном анализе металлов. Здесь на отдельные спектральные линии металлов установлен точно отрегулированный умножитель, соединенный со счетчиком. Металлический образец «обыскривается» в искровом разрядном контуре с частотой 100 искр в 1 *сек*, и свет искры при надежно установленном времени протекания процесса анализа оценивает на счет-

чике в промилях (‰) легирующие составляющие. Во время перерывов в работе на умножитель подается постоянный слабый равномерный свет от ксеноновой кварцевой лампы. На современных приборах ежедневно можно сделать несколько сотен полностью автоматических анализов металлов.

7. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

До тех пор, пока процессы нагрева не ведут к расплавлению при высокой температуре и одновременному световому излучению, для измерения быстропротекающих изменений температуры остается только косвенный путь измерения изменений сопротивления металла, обусловленных изменениями температуры. Этот путь дает ошибку из-за усреднения температуры между обоими электродами, так что нельзя получить точное значение температурного скачка внутри заданного интервала времени, например во время точечной сварки. Однако косвенные измерения по сопротивлению, по современным данным, полностью независимы от времени и лишь внесение датчиков напряжения в непосредственную близость от сварной точки, например специальных платиновых датчиков, представляет известные затруднения. Прежде всего нужно установить, что потенциональные измерительные датчики расположены перпендикулярно направлению нагревающего тока, например сварочного, чтобы не было дополнительно наложенной э. д. с., наведенной сварочным током, входящей в напряжение датчика. По этой причине, так как описанную наводку нельзя полностью исключить, целесообразно допустить протекание от одного измерительного датчика к другому переменного тока со звуковой или средней частотой 10 000 периодов в 1 *сек* и наблюдать падение напряжения или прирост падения напряжения при возрастании температуры между измерительными зондами во время протекания измерительного тока. Если импульсная сварка протекает очень быстро, например при непосредственном разряде конденсаторов, то нужно пользоваться измерительным током более высокой частоты, при известных обстоятельствах до величины порядка мегагерц. При этом требуется корректировка вследствие возникающего скин-эффекта, который зависит от проводи-

мости металла, расположенного между электродами, которая в свою очередь изменяется в зависимости от температуры. Поэтому измерительную частоту между датчиками нужно выбирать только такой высокой, какая требуется, принимая во внимание предполагаемый ход изменения температуры. Как только повышается температура зоны нагрева импульсным током, например при микроимпульсной закалке, может производиться дополнительное инфракрасное зондирование германиевыми фотодиодами. Максимум их чувствительности расположен на излучении с длиной волны 1,5 *мк*. При снижении температуры измеряемой поверхности тела до 300° С еще можно получить осциллограмму, т. е. эта температура является еще приемлемой для измерения величиной. Фотокатоды обычных вакуумных фотоэлементов из окиси цезия — серебра имеют максимум чувствительности при длине волны 1,1 *мк* и допускают измерение излучения при минимальной температуре 500° С. Если простым широкополосным усилителем усиливают импульс напряжения такого фотоэлемента ($\Delta f \approx 1$ *Мгц*), то можно в пределах его полосы пропускания осциллографически охватить любое крутое возрастание температуры. Генерирование теплоты как трансформированными разрядами конденсатора с крутизной возрастания около 10^{-3}—10^{-4} *сек* до амплитудного значения, так и непосредственными конденсаторными разрядными искрами или взрывом проволоки можно охватить соответствующей фотографической скоростью записи осциллографа. Непосредственные безындукционные искровые разряды со взрывом тонкой проволоки при большом излишке емкостной энергии для получения наивысших температур можно измерить только вакуумными фотоэлементами с чисто щелочными катодами, например калиевыми, при высоком ускоряющем напряжении; чтобы устранить пространственный заряд между катодом и анодом, часто бывает необходимо для температурного скачка, возникающего при вспышке света взрыва, в течение 10^{-8} *сек* прикладывать напряжение 2 000 *в* [Л. 36]. При так называемых «пинчах» сильноточных искровых разрядов часто пользуются также съемкой при помощи высокочастотной съемочной камеры и фотометрируют искровую фотографию вместо осциллограммы [Л. 70].

Применяя подобную технику измерения протекания

световых импульсов во времени, которая здесь использована для определения спектральных частот, можно также изучать частоту электромагнитных импульсов, которые излучаются любым разрядным контуром при разрядах конденсаторов. При этом можно использовать методику, получившую применение при определении места повреждения кабеля, если повреждение возникает вследствие непосредственного искрового разряда в масле соединительной муфты кабеля. Эта измерительная техника описана ниже вместе с прибором, который был создан для анализа частоты очень сильно заторможенных колебаний на кабелях или других проводах. Это маленький измерительный переносной прибор, который позволяет получить в лаборатории быструю информацию о протекании любых разрядов без необходимости делать ответвление провода, например в испытательных установках высокого напряжения и при больших импульсных конденсаторных батареях.

а) Анализатор частоты сильно заторможенных колебаний

Для определения места повреждения, т. е. места разряда, в такой вытянутой емкости, как кабель высокого напряжения, у которого произошел пробой с образованием металлического соединения между отдельными проводами или проводом и заземленной оболочкой, служит, как известно, возбуждение в кабеле колебаний собственной частоты посредством искусственного генератора и настройкой его до резонанса. По частоте вследствие известной скорости перемещения высокочастотного поля в кабеле можно сделать заключение о повреждении. Однако этот способ оказывается всегда непригодным, если не осуществляется металлическая проводимость, а при достижении определенного напряжения происходит искровой пробой в кабеле, который в спокойном состоянии изолирован. Описанная здесь приборная техника служит для простого анализа по Фурье или для определения максимума рядов Фурье, а на практике — для определения места повреждения кабеля, на котором при испытании испытательным прибором высокого напряжения вследствие прерывистых пробоев возникают импульсы блуждающих волн, направление и частота которых зависят от места повреждения.

Вопрос о том — можно ли при прерывистом замыкании на землю или коротком замыкании провода или кабеля по направлению возникающих импульсов тока перед и за искрой определить место повреждения, привел к исследованиям с электронно-лучевым осциллографом и ферритной антенной, которая направляется на кабеле окружающей ее катушкой. Вдоль рабочего кабеля со свинцовой оболочкой определяется при пробое кабеля направление первой полуволны пакета колебаний, воспринимаемого антенной, расположенной вдоль поврежденного провода или кабеля, и показывается, что первая полуволна перед местом пробоя направлена противоположно полуволне, следующей за ним. Исследования, кроме того, установили, что частота пакета колебаний вдоль кабеля меняется в районе места искрового пробоя. В кабеле возникают колебания на обоих отрезках, заданных местами пробоя, с двумя независимыми одна от другой частотами. После нахождения обеих частот (f_1 и f_2) определяется место искрового пробоя L_f в процентном отношении к общей длине кабеля: $L=L^{f_1}/_{f_2}$. Так как дело идет о пакете колебаний только с малым числом полуволн, применяются осциллографические трубки с послесвечением и продолжительность периода измеряется циркулем на экране. Так как подобные опыты были многообещающими, аппаратура была существенно упрощена. Был создан рассмотренный ниже анализатор, который работает без осциллографической трубки и благодаря малому весу и малой занимаемой площади прост в обслуживании. Индикатор этого прибора образуется тремя лампами тлеющего разряда, свечение которых указывает, какой знак имеет первая полуволна принимаемого пакета колебаний или имеется ли согласование частоты. Вид показания не зависит от амплитуды. Схема представлена на рис. 242, исполнение прибора — на рис. 243. Пакет колебаний, поступающий от ферритной антенны *1*, распространяется через конденсатор *2*, запирающий переменное напряжение рабочей частоты, на первую лампу усилителя *3*, усиливается и поступает на две лампы *4*, снова усиливается и через емкостную связь *5* подается на колебательный контур *6—7*. Этот колебательный контур состоит из конденсатора переменной емкости *7*, параллельно включенного с катушками *6a*, *6b*, *6c*. Благодаря включению кристал-

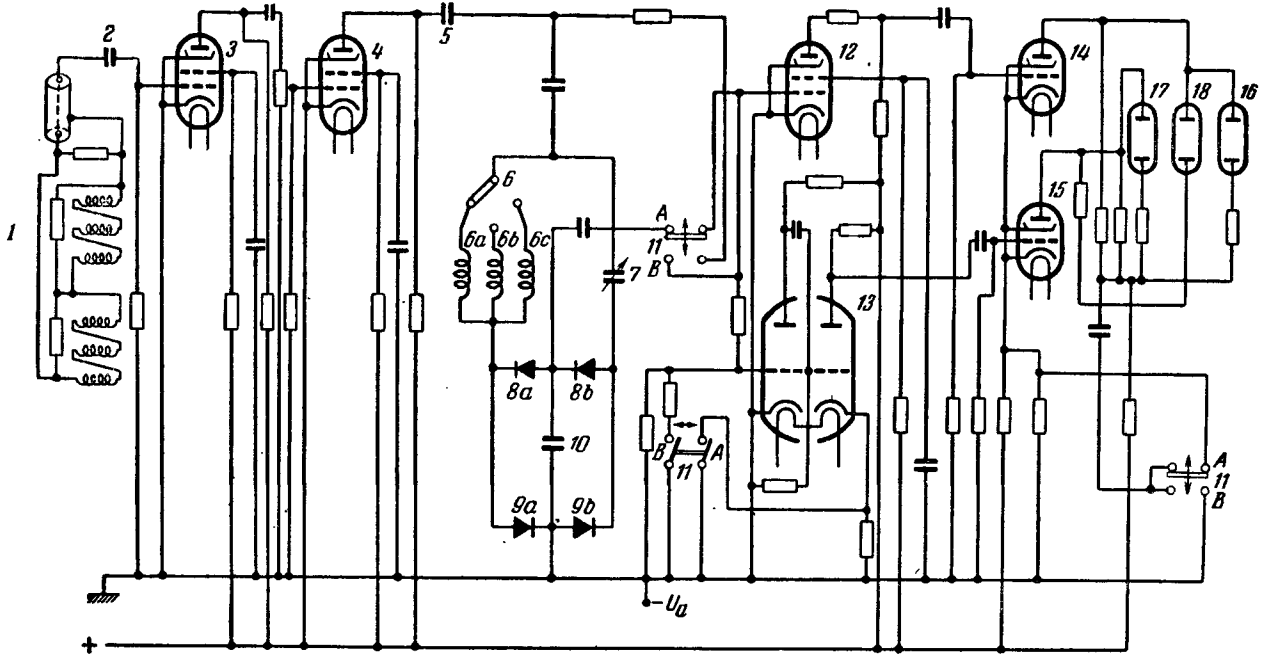


Рис. 242. Схема анализатора частоты для сильно заторможенных форм разряда, измеряющего магнитный вектор.

лических диодов *8a* и *8b* в обратную связь между катушкой и настроенным конденсатором, а также соединению с землей *9a* и *9b* на внесенном в эту схему зарядном конденсаторе *10* только тогда достигается номинальное значение постоянного напряжения, когда нет никакого согласования. Знак импульса постоянного напряжения изменяется при превышении резонансной установки контура *6—7* по отношению к генерируемой кабелем демп-

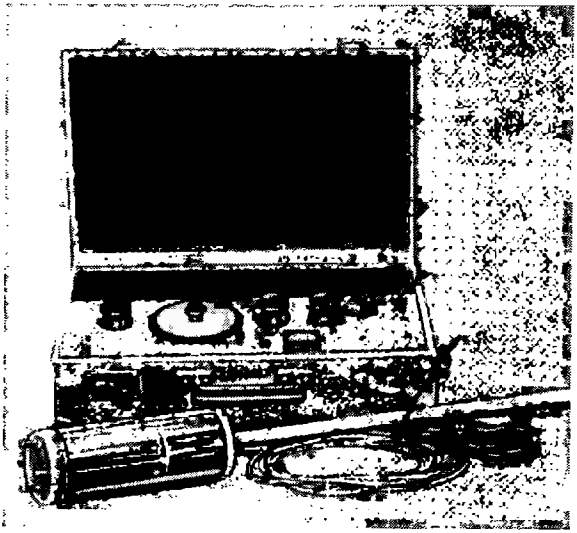


Рис. 243. Переносное выполнение прибора по рис. 242; впереди лежит ферритовая антенна для зондирования магнитного вектора поля (Спинтерион).

фированной частоте при вращении настроечного конденсатора *7*. Если переключатель *11* установлен в положении *A*, то импульс постоянного напряжения проходит дальше к лампам *12* и *13*, представляющим третью ступень усилителя. За этими лампами он распространяется только с различными знаками, однако в обоих случаях усиливается одинаковым образом на тиратронах *14* и *15*. Так как тиратроны возбуждаются только положительным напряжением, возбуждается только один из двух. Если настроечный конденсатор *7* переведен через уста-

новку резонанса, то изменяется знак получаемого от зарядного конденсатора импульса постоянного напряжения, так что теперь всегда возбужден второй тиратрон. Каждый тиратрон работает на две наружные лампы тлеющего разряда *16* и *17*, которые зажигаются, если возбужден соответствующий тиратрон, так что при переходе настроечного конденсатора через установку резонанса зажигание переходит от одной к другой лампе тлеющего разряда. Это изменение в действии ламп тлеющего разряда показывает момент правильной настройки частоты на шкале конденсатора *7* независимо от амплитуды колебаний.

Лампа тлеющего разряда *18* может применяться дополнительно для того, чтобы указать, происходит ли вообще срабатывание одного из двух тиратронов.

Если включатель *11* повернут в положение *B*, то пакет колебаний, поступивший в прибор, протекает без искажения к обеим лампам *12* и *13*, представляющим собой третью ступень усилителя, которые одинаково усиливают его, однако передают дальше с различными знаками на относящиеся к ним тиратроны *14* и *15*. Так как первая полуволна поступает положительной только к одному из двух тиратронов, этот тиратрон сразу срабатывает, в то время как второй тиратрон поджигается только второй полуволной. Вследствие этого лампа тлеющего разряда, расположенная между анодами обоих тиратронов, кратковременно зажигается со свечением на соответствующем электроде, а именно до тех пор, пока не загорится также второй тиратрон, т. е. в течение первой полуволны.

При изменении направления, т. е. обороте первой полуволны, загорается средняя лампа тлеющего разряда *18* на противоположном электроде. Практически область измерения колебательного контура *6—7* расположена между 3 и 100 *гц* в соответствии с возможной частотой на проводах и кабелях.

Описанная схема может применяться там, где простыми средствами и кратким временем измерения нужно быстро установить без соединения проводами частоту какого-либо явления природы или технического процесса при сильно заторможенном протекании разряда, так что определение максимальной частоты Фурье провести трудно.

b) Измерение угла потерь емкостей посредством демпфирования колебаний

Если разряжают конденсатор через катушку с высокой добротностью, то получают заторможенные колебания тока и напряжения. Торможение в случае идеальной катушки зависит только от угла потерь конденсатора. Реализовать такую идеальную катушку не удается, но опыты можно проводить с хорошими техническими катушками. Измеряемый конденсатор, практически это часто кабель высокого напряжения, заряжается до высокого напряжения и затем невибрирующим включателем ударно подключается параллельно высококачественному дросселю так, что создается параллельный резонансный контур. Если теперь известны все данные контура, кроме угла потерь конденсатора $\operatorname{tg}\delta$, то $\operatorname{tg}\delta$ можно получить измерением затухания. Для измерения затухания контура сначала заряжается конденсатор или кабель, а потом выключателем высокого напряжения подключается к дросселю. Заряд, накопленный в конденсаторе, начинает колебаться в контуре. Возникающие затухающие колебания записываются осциллографом (электронный осциллограф или фотоэлектрический регистрирующий прибор с точечной записью) и определяется затухание по отношению амплитуд. Фрейзе [Л. 112] показал, что этот способ пригоден для микроанализа угла потерь и выявляет различие полуволн, которое вызывает ранее проведенная зарядка (поляризация).

Для измерения угла потерь конденсатора по описанной схеме пригодны следующие соотношения:

$$\ln\frac{A}{A_1}=\pi\frac{R}{\omega L};$$

$$R=\frac{\ln A_1/A_2\omega L}{\pi};$$

$$R_2=\frac{\ln A_1/A_2\omega_0 L}{\pi}-R_1;$$

$$\operatorname{tg}\delta=R_2\omega_0 C.$$

Так как по принципу работы конденсатора индуктивность измеряемого кабеля сама колеблется с собственной частотой, получается

$$\omega L=\frac{1}{\omega C};$$

соответственно

$$R_2 = \operatorname{tg}\delta\,\omega_0 L.$$

После подстановки R_2 получим:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\ln A_1/A_2}{\pi} - \frac{R_1}{\omega_0 L}.$$

R_1 определяется как при постоянном токе, так и в колебательном режиме:

$$R_1 = R_0 + (qf_0);$$

здесь R_0 — сопротивление при постоянном токе, а второе слагающее, в котором q — постоянная и f_0 — резонансная частота контура, представляет собой зависимую от частоты составляющую. Постоянная q задается конструкцией дросселя и определяется замером измерительной индуктивности. Если принять

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\ln A_1/A_2}{\pi} - Q,$$

последнее может быть использовано для определения $\operatorname{tg}\delta$.

После подстановки R_1 получим:

$$Q = \frac{R_0 + (qf_0)}{\omega_0 L} = \frac{R_0}{\omega_0 L} + \frac{q}{2\pi L}.$$

Здесь второе слагаемое постоянно и лишь первое слагаемое содержит переменную, а именно f_0 в виде угловой частоты ω_0.

После подстановки числовых значений

$$Q = \frac{1{,}035}{f_0} + 9{,}3 \cdot 10^{-3}.$$

Для того чтобы облегчить работу при расшифровке осциллограммы, представляют Q как функцию f_0 в форме кривой, пример которой представлен на рис. 244 для определенного измерительного дросселя. $\operatorname{tg}\delta$ находится следующим образом. На логарифмической линейке находят натуральный логарифм двух следующих одна

за другой амплитуд. Затем его делят на π и, наконец, от полученного таким образом частного вычитают значение Q, полученное по кривой (рис. 244).

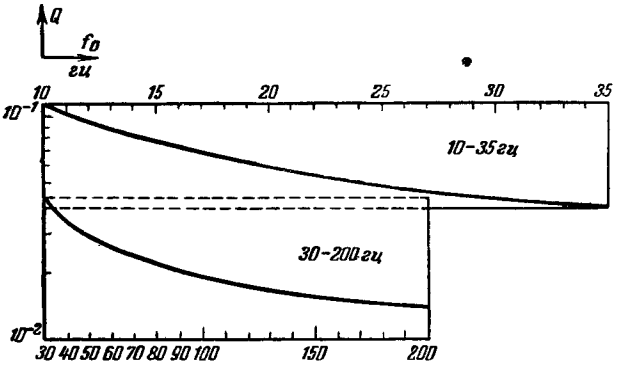


Рис. 244. Значения Q как поправочной постоянной в зависимости от частоты для измерительного дросселя.

с) Пример измерения угла потерь емкости посредством демпфирования колебаний

Возможно малыми потерями, малым собственным сопротивлением и высокой индуктивностью обладает круглая катушка с квадратным сечением витков. При этом получают действительно минимум сопротивления и максимум индуктивности. Можно при затрате 400 *кг* меди получить дроссель с индуктивностью 1,6 *гн* с собственным сопротивлением 5 *ом*. Но при наблюдении осциллограмм в области частот 50—300 *гц*, которые генерирует колебательный контур, составленный из такой катушки с параллельно включенной емкостью, находят, что наступает дополнительное торможение вихревыми токами, которые вызваны переменным полем в проводниковой меди. Эти потери на вихревые токи действуют таким образом, что при частоте 300 *гц* сопротивление катушки составляет 25 *ом* вместо 5 *ом* при постоянном токе. Поэтому выполняют, например, катушку четырехслойной цилиндрической на жестком деревянном каркасе. При этом при заданном расходе меди достигают только малой индуктивности, около 1 *гн* при сопротивлении 5 *ом*, но уменьшают напряженность поля, что вследствие квадратичной зависимости потерь на вихревые токи от напряженности поля проявляется в благоприятном сни-

жении этих потерь. Возрастание сопротивления до 25 *ом* наблюдается теперь уже при повышении частоты с 300 до 500 *гц*. Поэтому при изготовлении катушки часто умышленно выбирают мало желательную с точки зрения индуктивности цилиндрическую форму.

Для разряда исследуемого конденсатора на катушку к выключателю предъявляют высокие требования отсутствия вибрации контактов. Касание должно происходить ударным образом без заметного искрообразования и задерживаться с первого мгновения. Устройство для механического движения, соответствующее этому условию, требовало бы апериодического процесса перемещения. Механически это требование нельзя выполнить одним-единственным демпфирующим звеном. Поэтому был сконструирован специальный выключатель высокого напряжения, в котором включение осуществляется контактными шарами. Контактные шары покрыты мягкой контактной сеткой, которая имеет возможность пластически деформироваться.

Вследствие облицовки контактных шаров медной оплеткой наступает дополнительная сильная затяжка искры. Медная оплетка после нескольких включений покрывается толстым окисным или закисным слоем, который повышает работу выхода электронов и сильно тормозит появление искры. Включение происходит так быстро, что практически пробой искры перед соприкосновением при эксплуатационном напряжении 60 *кв* едва ли можно заметить.

Особое достоинство описываемого способа измерения заключается в малом весе и незначительном потреблении электроэнергии легко транспортабельным переносным прибором высокого напряжения с высокой точностью измерения, так как прибор лишь должен быть в состоянии медленно заряжать испытываемый объект и поддерживать установленное напряжение. Для этого используют описанный прибор (рис. 209) с каскадной схемой и гиперболической $U - I$-характеристикой, в котором киловольтметр как прибор постоянного тока через высокоомное измерительное сопротивление подключен непосредственно к высокому напряжению. Практически подобные приборы работают с точностью измерения около 1%. Внутреннее сопротивление этого прибора благодаря каскадной схеме очень высоко. Оно зависит

от напряжения и при обычных измеряемых напряжениях составляет 20—60 *Мом*. Вследствие внутреннего сопротивления этот прибор не дает заметного дополнительного демпфирования колебательного контура.

Как и можно ожидать, описанный метод измерения угла потерь дает результаты, отличающиеся от таковых у классического моста Шеринга. Последний осредняет угол потерь в течение всего процесса измерения; в то же время осциллограмма разряда позволяет производить определение $\operatorname{tg}\delta$ от амплитуды к амплитуде. Следовательно, можно говорить о микроанализе угла потерь, который может внести существенный вклад при отыскании лучших диэлектриков.

Угол потерь больших конденсаторных батарей часто становится возможным измерить в лаборатории только изложенным методом, так как требуемое для измерений на переменном токе число киловольт-ампер едва ли можно получить. Конденсатор емкостью 50 *мкф* при измерительном напряжении 30 *кв* при 50 *гц* требует импульсной мощности

$$N_{\text{имп}} = U^2\omega C = 9 \cdot 10^8 \cdot 100\pi \cdot 5 \cdot 10^{-5}\ \textit{ва} \approx 15\ \textit{Мва!}$$

Кривая на рис. 244 показывает значение Q в соответствии с расчетом для дросселя 5 *ом*, 1 *гн*.

Определение числовых значений осциллограммы разряда часто совсем излишне, если желают испытать конденсатор только в известном интервале времени, например до начинающегося ухудшения изоляции. В этом случае только сравнивают равное число амплитуд различных осциллограмм. Практически на кабелях этот способ применим очень ограниченно, так как существующие нормы до сих пор предписывают измерение мостом Шеринга и числовые результаты обоих методов не совпадают (мост Шеринга измеряет среднее значение, излагаемый способ, напротив,— каждую отдельную полуволну). Результаты представлены в полярных координатах и обсуждены Фрейзом в [Л. 112] и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ambrosen, D. Pat. Anm. C 6019 VIII c/21 g vom 26.6.52.
2. Kurchatov, Nucleonics 14 (1956) 37—42.
3. DP 901 087.
4. VDI Wärmetechn. Arbeitsmappe, Dt. Ing. Verlag 1953/1954, Arbeitsblatt B 5/B 6.
5. Liebendoerffer, Jb. Chem. Ind., № 7 (1958).
6. Früngel F., Optik 3 (1948), 128—136.
7. Johnson J. E., Description of mobile 250 kV D. C. and impulse set for cable testing and fault locating (1957).
8. Früngel F. und Vogler H.; Fortschr. Röntgenstrahlen, 71 (1949), 632—635.
9. Strigel R., Elektrische Stoßfestigkeit, Springer-Verlag (1955), 104.
10. Raether H., Z. Phys. (1938), 611—624.
11. Früngel F., Z. angew. Phys., 6 (1954), 183—192.
12. Marx E., VDI-Zeitung, Sept. 1949, 25—35.
13. Brinkmann K. und Marderwald E., ETZ 73. Jahrg. (1952), 449—450.
14. Fürth und Waniek, Rev. Sci. Instr., 27 (1956), 19 ff.
15. VDE 0450/XI. 39, Leitsätze für Erzeugung und Verwendung von Stoßspannung f. Prüfzwecke.
16. Binder L., Die Wanderwellenvorgänge auf experimenteller Grundlage, Springer-Verlag (1928), 24 ff.
17. Brit. Patent 699 144 vom 19.11.1951.
18. Früngel F., Z. angew. Phys., 5 (1953), 102—104.
19. Baatz H., ETZ, 7 (1951), 191—198.
20. Fletcher, Phys. Rev., 76 (1949), 1501—1511.
21. Steenbeck M., Wissenschaftl. Veröffentl. der Siemenswerke, 17, 1 (1938).
22. Slack Ch. M. und Ehrke L. F., J. Appl. Phys., 12 (1941), 165.
Slack Ch. M. und Dickson D. C., Jr., Proc. I. R. E., 35 (1947), 600.
23. Trump J. G. und van de Graaf R. J., J. Appl. Phys., 18 (1947), 327.
24. Schaaffs, W. und Trendelenburg F., Z. Naturforsch., 3A (1948), 656—668.
25. Schaaffs W., Z. angew. Phys., 1 (1949), 462.
26. Elle D., Z. angew. Phys., 8 (1956), 82—85.
27. Schaaffs W. und Herrmann K. H., Z. angew. Phys., 6 (1954), 23—35.
28. Marx E., ETZ, 46 (1925), 1928.
29. Elle D., Z. angew. Phys., 6 (1954), 49—54.

60. Früngel F., Z. angew. Phys., 8 (1956), 86—90.
31. Brasch, Anschlußtherapie, 4 (1932), 505—520.
32. Hoffmann und Schumacher, Weld. Handbook (1950), 354 und 442, New York.
33. The Electrician (1941), 371—372, «DC-welding with a transformer».
34. Brunst W., Das elektrische Widerstandsschweißen, Springer-Verlag, Berlin, 1952, 152.
35. Früngel F. und Thorwart W., VDI—Z, 96 (1954), 18—21.
36. Früngel F., Optik, 3 (1948), 124.
37. Rust H. H. und Drubba H., Z. angew. Phys., 5 (1953), 251—252.
38. Bailitis E., Z. angew. Phys., 9 (1957), 429—434.
39. Keussler V. V., Spectrochem., Acta 4 (1951), 366; Umschau 51 (1951), 88.
40. Early H. D. und Martin A., Transact. Amer. Inst. Electr. Engrs, 74 (1955), 788.
41. Früngel F., Bailitis E. und Thorwart W., Proc of 3rd Intern. Congr. (10.9—15.9.1956), 397—399.
42. Toepler, Ann. Phys. (1908), 1043—1058.
43. Fünfer E., Z. angew. Phys., 1 (1949), 295.
44. Luy H. und Schade R., Photographie et Cinematographie Ultrarapides, Dunod., Paris, 1956.
45. Aumont R. und Vodar B., Photographie et Cinematographie Ultrarapides, Dunod., Paris, 1956.
46. Chestermann W. D. und Glegg, Photographie et Cinematographie Ultrarapides, Dunod., Paris, 1956.
47. Raether H., Z. Phys. (1938), 611 ff.
48. Raether H., Z. Phys. (1939), 664 ff.
49. Schwieker, Z. Phys. (1940), 562 ff.
50. Früngel F., Proc. of 3rd Intern. Congr. (10.9—15.9.1956), 57—61.
51. Fletcher, Phys. Rev., 76, 10, 1501—1511.
52. Raether H., Z. angew. Phys., 6 (1954), 212.
53. Weizel W., Z. f. Phys., 135 (1953), 639—657.
54. Früngel F., Zeitlicher und spektraler Ablauf intensiver Funkenentladungen (1944), Forschungsbericht Nr. 1856 in ZWB (Zentrale für das wissenschaftl. Berichtswesen, Berlin).
55. Thorwart W., Spitzenspektrum v. Lichtimpulsquellen, ZWB (1944).
56. Glaser G., Optik, 7 (1950), 33—53.
57. Rompe R. und Weizel W., Z. Phys., 122 (1944), 639 ff.
58. Forsythe W. E., Measurement of radiant energy, New York, 1937.
59. Früngel F., Z. angew. Phys., 5 (1953), 102—104.
60. Klumb H. und Koch B., Verwendung von UV-Strahlung, Forschungsbericht Nr. 1598 in der ZWB.
61. Klumb H., Die Verwendbarkeit von UV-Strahlen zur Übertragung von Nachrichtensignalen, Meß-Signalen und Fernbetätigungssignalen. Vorbericht des Inst. f. Fernmeldetechnik der Techn. Academie d. Luftwaffe, ca. 1940.
62. Meyer A. E. H. und Seitz E. O., Ultraviolette Strahlen, Verlag W. de Gruyter, Berlin (1949), 132.

63. Olbers W., Grundlagen der objektiven Wolkenhöhenmessung. Techn. Mitteilungen d. Instrumentenwesens des dtsch. Wetterdienstes, Neue Folge, Nr. 1 (1955).
64. Früngel F., DP 826369 vom 31.5.1950.
65. Früngel F., DP 836 410 vom 10.2.1950.
66. Altrogge W., ATZ, 5 (1952), 112.
67. Franck S., Meßentladungsstrecken (Ionenstrecken). Springer-Verlag, Berlin, 1931.
68. Weicker W., ETZ, 32 (1911), 436.
69. Peek F. W., Dielectric Phenom., 3. Aufl., New York, 1929.
70. Kuske A., Verfahren der Spannungsoptik. Dt. Ing. Verlag, Düsseldorf, 1950.
71. Hennig G., Dauermagnet-Technik, Franzis-Verlag, München, 1952, 75.
72. Ванюков М. П., Мак А. А., Урес М. А., Парасинская Г. В., Оптика и спектроскопия, 1 (1956), 642—649; Оптика и спектроскопия 4 (1958), 90—92.
Маршак И. С., Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии, 1 (1956), № 5, 366—368, ЖЭТФ, 16 (1946), 703—717, 718—727.
73. Früngel F., DP 892 629 vom 13.11.1943.
74. Früngel F., DP 881 211 vom 4.8.1944.
75. Früngel F., DP 881 835 vom 4.8.1944.
76. Früngel F., DP 890 990 vom 24.9.1943.
77. Früngel F., Oesterr. Pat. 195 145.
78. Früngel F., Norweg. Pat. 93 484.
79. Früngel F., Z. angew. Phys., 8 (1956), 86—90.
80. Früngel F. und Bailitis E., Phys. Verh., 6 (1956), 186—187.
81. Knight B., Herbert L. and Maddison R. C., The Institution of Electrical Engineers, № 2947 (1959); Proc. of the Inst. 106 A (1959).
82. Bird M. A., The Institution of Electrical Engineers, № 2879 (1959); Proc. of the Inst. 106 A (1959).
83. Carruthers R., The Institution of Electrical Engineers, № 2915 (1959); Proc. of the Inst. 106 A (1959).
84. Robson A. E. and Hancox R., The Institution of Electrical Engineers, № 2948 (1959); Proc. of the Inst. 106 A (1959).
85. Payne M. and Kaufman S., The Institution of Electrical Engineers, № 2900 (1959); Proc. of the Inst. 106 A (1959).
86. Butt E. P., Carruthers R., Mitchell J. T. D., Pease R. S., Thonemann P. C., Bird M. A., Blears J. and Hartill E. R., The Institution of Electrical Engineers, № 2901 (1959); Proc. of the Inst. 106 A (1959).
87. Fitch R. A. and McCormick N. R., The Institution of Electrical Engineers, British Nuclear Energy Conference, April 1959.
88. Hartill E. R., The Institution of Electrical Engineers, № 2876 (1959); Proc. of the Inst. 106 A (1959).
89. Fry D. W., The Institution of Electrical Engineers, № 2903 (1959), Lecture on Brit. Nuclear Energy Conf., 4.12.1958.
90. Früngel F., Thorwart W. und Mahnau H., Phys. Verh., 7 (1957), 191—192.
91. Früngel F., Phys. Verh., 4 (1955), 62—63.

92. Weske J. R., Techn. Note BN-128 AFOSRTN 57 304 AD 154 214 (1958), Univ. Maryland, College Park, USA.
93. Bomelburg H. J., Techn. Note BN-68 OSR-TN-56-38 ASTIA, № AD-80549 (1957), Univ. Maryland, College Park, USA.
94. Herzog F., A new experimental approach to the analysis of compressor performance, USAF BN-90 AFOSR-TH-57-3 AD-115 035 (Jan. 1057).
95. Thorwart W., Photomagazin, 11 (1958).
96. Thorwart W., Kinotechnik, 9 (1958), 254—258.
97. Thorwart W., Naturw. Rdsch., 6 (1959), 233—235.
98. Früngel F. und Hands G., AEÜ, 13 (1959), 121—131; 175—183.
99. Früngel F., Phys. Verh., 3 (1952).
100. Koch B., Optik, 5 (1949), 258—273.
101. Middleton and Knowles W. E., Vision through atmosphere (1952), Univ. Toronto Press.
102. Früngel F., DP 980 990 v. 24.9.43.
103. Früngel F., DP 967196 v. 18.3.43.
104. Früngel F., DBP 1008 620 v. 20.4.54.
105. Früngel F., DBP 1048 199 v. 20.4.54.
106. Smith S., Astrophys. Journal, Gl, 186 (1925).
107. Früngel F., DBP 1011 989 v. 20.4.54.
108. Früngel F., Electrowelt, 4 (1959), 67—68.
109. Früngel F., DP 971 719 v. 29.8.51.
110. Fischer H., Journ. Optical Soc. America, 47, 11 (1957), 981—984.
111. Fischer H., Phys. Verh., 6, 177 (1955).
112. Freise W. und Früngel F., ETZ 80, 10 (1959), 296—300.
113. Цуккерман В. А. и Авдеенко А. И., ЖТФ, 7 (1942), 185.
114. Цуккерман В. А., ДАН СССР, 40 (1943), 7.
115. Цуккерман В. А., ДАН СССР, 53 (1946), 4.
116. Страховский Г. М. и Цуккерман В. А., ИАН СССР, ОТН 3 (1946).
117. Цуккерман В. А. и Манакова М. А., ЖТФ, 27 (1957), 391.
118. Лукашев А. А., Приборы и техника эксперимента, 4 (1957), 56.
119. Зюзин В. П., Манакова М. А. и Цуккерман В. А., Приборы и техника эксперимента, 1 (1958), 85.